

Sistema de monitorização e controlo para atuador pneumático

Bruno Tiago Coelho Capela

Dissertação do MIEM

Orientadores: Professores Paulo Abreu e Fátima Chousal



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Automação**

Setembro de 2018

Resumo

Os sistemas pneumáticos são bastante usados, devido à simplicidade de projeto e controlo, viabilidade, robustez e segurança. Exemplos de aplicação incluem sistemas de travagem de autocarros e camiões e martelos de demolição. Como elemento propulsor, estes sistemas usam ar comprimido (exceto raras exceções). Normalmente, um compressor acionado por um motor eléctrico comprime o ar, que por sua vez, aciona diversos atuadores pneumáticos.

É importante referir que pressão excessiva pode provocar danos mecânicos, fugas podem provocar perdas de pressão e caudal no sistema, excesso de humidade pode provocar corrosão e danos no lubrificante, danos mecânicos e má lubrificação podem provocar temperatura excessiva e temperatura excessiva também pode provocar danos.

Nesta Dissertação é implementado um sistema de controlo e monitorização para atuador pneumático que permite a aquisição e registo da informação em base de dados com possibilidade de acesso remoto.

É utilizado um microcontrolador, baseado em sistema Arduino, para fazer o controlo e monitorização de um sistema pneumático constituído por um cilindro de duplo efeito, com dois fins de curso, que é controlado por uma eletroválvula digital.

O sistema de monitorização permite monitorizar a pressão, humidade e temperatura do ar comprimido em diferentes partes do circuito pneumático, bem como monitorizar os fins de curso.

O número de movimentos realizados pelo sistema, é controlado via web, assim como o tempo entre movimentos (o cilindro fica parado durante um dado tempo em cada posição extrema, a recolher amostras).

O sistema desenvolvido constitui assim uma experiência de controlo remoto acessível a partir de qualquer computador ligado à rede local.

É analisado o comportamento do sistema pneumático para várias condições de funcionamento, ilustrando assim as potencialidades do sistema desenvolvido. O sistema permite controlar o movimento do cilindro e registar a evolução da pressão, temperatura e humidade ao longo do tempo.

Abstract

Pneumatic systems are widely used due to the simplicity of design, control, sturdiness and safety. Applications include bus and truck braking systems and demolition hammers. As a propellant, these systems use compressed air. Typically, a compressor driven by an electric motor compresses the air, which in turn drives a number of pneumatic actuators.

It is important to note that excessive pressure can cause mechanical damage, leaks can cause pressure and flow losses in the system, excess moisture can cause corrosion and lubricant damage, mechanical damage and poor lubrication can cause excessive temperature and excessive temperature can also cause damage.

In this Dissertation, a control and monitoring system for pneumatic atuator is implemented that allows the acquisition and registration of the information in a database with the possibility of remote access.

A microcontroller, based on the Arduino system, is used to control and monitor a pneumatic system using a double-acting cylinder that is controlled by a digital solenoid valve.

The monitoring system allows monitoring the pressure, humidity and temperature of the compressed air in different parts of the pneumatic circuit, as well as detecting the position switches.

The number of movements performed by the system as well as the time between movements (the cylinder is stopped during a given time in each extreme position) are controlled through a web page.

The developed system can be seen as a remote control experience accessible from any computer connected to the local network.

The behavior of the pneumatic system is analyzed for various operating conditions, thus illustrating the potential of the developed system. The system allows recording the time evolution of pressure, temperature and humidity.

Agradecimentos

Aos meus orientadores Professores Paulo Abreu e Fátima Chousal, na partilha de conhecimentos e no inculcar de responsabilidade. Também pela sua exigência, incentivo, sugestões e ajuda demonstrados durante a realização desta dissertação.

A todos os restantes professores (e outros profissionais) e colegas do ramo de automação que possam ter contribuído de algum modo para a realização desta Dissertação.

Aos meus pais, por todo o apoio que permitiu a minha formação superior.

À DGES-SASUP que me forneceu bolsa de estudos.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos...

Índice de Conteúdos

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento de um Sistema de Controlo e Monitorização.....	3
1.2. Objetivos da Dissertação.....	3
1.3. Estrutura da Dissertação.....	4
 2. Soluções de monitorização para sistemas pneumáticos.....	 5
2.1. Aventics.....	5
2.2. Festo.....	7
2.3. Bimba.....	8
2.4. Síntese.....	9
 3. Descrição da Banca de teste.....	 11
3.1. Cilindro pneumático.....	12
3.2. Válvula direcional.....	12
3.3. Fins de curso.....	13
3.4. Sensores de pressão.....	13
3.5. Sensor de humidade e temperatura.....	14
3.6. Síntese.....	15
 4. Desenvolvimento do Sistema de controlo e monitorização.....	 17
4.1. Microcontrolador.....	17
4.2. Comando dos atuadores.....	18
4.3. Condicionamento de sinal dos sensores.....	19
4.4. Módulo web.....	20
4.5. Algoritmo de controlo.....	21
4.6. Síntese.....	23
 5. Solução de interface, armazenamento e visualização de dados.....	 25
5.1. Página de interface com utilizador.....	26
5.2. Armazenamento de dados.....	27
5.3. Visualização de dados.....	28
5.4. Síntese.....	28
 6. Testes do sistema desenvolvido.....	 29
6.1. Caracterização dos valores de pressão.....	29
6.2. Comportamento do sensor de temperatura e humidade relativa.....	30
6.3. Evolução da pressão nas câmaras do cilindro.....	31
6.4. Evolução da temperatura numa câmara do cilindro.....	37
 7. Conclusões e Perspetivas de trabalho futuro.....	 43
7.1. Conclusões.....	43
7.2. Perspetivas de trabalho futuro.....	44

Referências.....	45
-------------------------	-----------

ANEXO A: Endereços utilizados no browser.....	47
--	-----------

Siglas e abreviaturas

AES – Advanced electronics system
HMI – Human machine interface
I2C – Inter integrated circuit
IDE – Integrated development environment
LAN – Local area network
MAC – Media access control
MISO – Master in slave out
MOSI – Master out slave in
PHP – Hypertext preprocessor
PLC – Programmable logic controller
PWM – Pulse width modulation
RTU – Remote terminal unit
SCK – Serial clock
SCL – Serial clock line
SDA – Serial data line
SPI – Serial peripheral interface
SPM – Smart pneumatics monitor
SS – Slave select
USB – Universal serial bus

Lista de figuras

1.1: Instalação pneumática, adaptado de GISON Machinery Co, Compressed air system network and components.....	2
1.2: Estrutura do sistema a desenvolver.....	3
2.1: Sistema <i>Smart Pneumatics Monitor</i> da Aventics.....	6
2.2: Exemplo com o Sistema <i>Smart Pneumatics Monitor</i>	6
2.3: Sistema da Festo, onde pode ser implementado o <i>System Diagnostics</i>	7
2.4: Sistema <i>IntelliSense®</i> da Bimba.....	8
3.1: Sistema pneumático utilizado.....	11
3.2: Cilindro Pneumático Festo 193991.....	12
3.3: Eletroválvula Joucomatic 55192009.....	12
3.4: Fim de curso SMC D-A73.....	13
3.5: Sensor de pressão SMC ISE40A.....	13
3.6.a: Encapsulamento com o sensor de humidade e temperatura.....	15
3.6.b: Possíveis configurações do sensor.....	15
4.1: Sistema de controlo e monitorização.....	17
4.2: Arduino Uno.....	18
4.3: Esquema de comando da eletroválvula.....	19
4.4: Microcontrolador, sensores utilizados e condicionamentos de sinal.....	20
4.5: Microcontrolador e interligação ao módulo web.....	21
4.6: Gráficos de comando do atuador e posição do cilindro.....	21
4.7: Fluxograma do algoritmo de controlo.....	22
5.1: Troca de informação na rede local.....	25
5.2: Página web para interface com utilizador.....	26
5.3: Base de dados.....	27
5.4: Tabela de pressão na câmara 1.....	27
5.5: Valores de pressão na câmara 1.....	28
6.1: Evolução da temperatura e humidade para diferentes níveis de pressão.....	30
6.2: Dois movimentos, com temporização, sem utilização do sensor de temperatura e humidade, para uma pressão de operação de 4 bar.....	32
6.3: Dois movimentos, com temporização, para uma pressão de operação de 4 bar.....	33
6.4: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de operação de 4 bar.....	34
6.5: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de operação de 2 bar.....	35
6.6: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de operação de 6 bar.....	36
6.7: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar.....	37
6.8: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar.....	38
6.9: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar.....	38
6.10: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar.....	39
6.11: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar.....	39
6.12: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar.....	40
6.13: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar.....	41
6.14: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar.....	41

6.15: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar.....	42
---	----

Lista de tabelas

3.1: Medições de pressão e tensão.....	14
6.1: Medições de pressão e valores do microcontrolador.....	29

1 Introdução

À medida que os sistemas computacionais ficam com maior capacidade de processamento, mais compactos, eficientes e mais acessíveis, torna-se mais fácil, interessante e viável de poderem ser aplicados em diversas áreas. O controlo e a monitorização são partes importantes da gestão de qualquer processo. Existem várias particularidades com diferentes capacidades de comando e monitorização para vários processos. O controlo e a monitorização de processos industriais foi uma área que também evoluiu com a evolução dos sistemas computacionais.

O facto de um sistema destes poder estar ligado a uma *local area network* (LAN) apresenta várias vantagens e flexibilidade, como por exemplo aceder ao sistema a partir de qualquer computador ligado à rede. Se for usada uma rede local para suportar o comando e monitorização, é possível registar os valores obtidos num servidor (com base de dados) ligado à mesma rede do sistema de monitorização. Numa aplicação em rede local, uma dada máquina ligada à mesma rede pode controlar processos em causa e aceder aos dados recolhidos. Fora da rede local também é possível, mas a velocidade é tipicamente mais baixa. De modo a ser possível avaliar o comportamento de um dado sistema, o seu estado, a proximidade do seu fim de vida, planear a manutenção preventiva, ou simplesmente certificar que o sistema está a funcionar de acordo com o previsto, é preciso ter capacidade de monitorização.

Os sistemas pneumáticos são bastante usados, devido à simplicidade de projeto e controlo, robustez e segurança. Normalmente, um compressor acionado por um motor elétrico comprime o ar, que por sua vez, aciona diversos atuadores pneumáticos.

Na figura 1.1 é possível visualizar uma instalação pneumática típica. O ar é aspirado por um compressor, passa por um filtro, é seco, é armazenado num reservatório de ar e é distribuído para diversos atuadores pneumáticos.

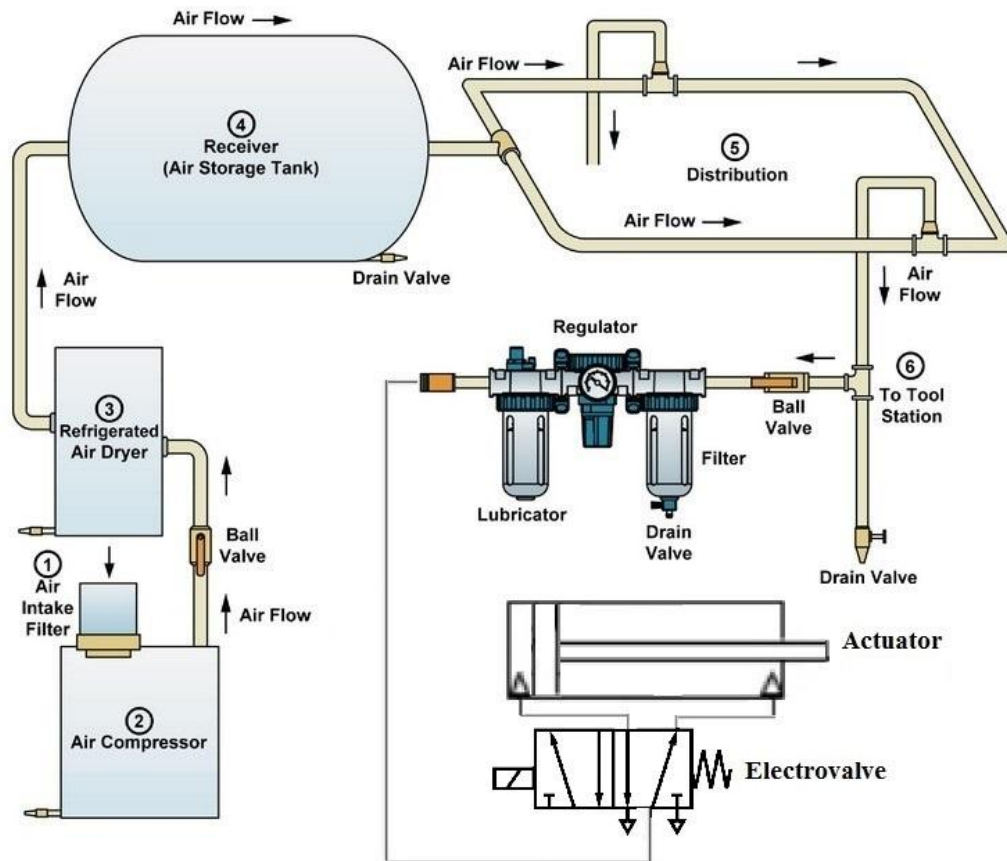


Figura 1.1: Instalação pneumática, adaptado de GISON Machinery Co, Compressed air system network and components [1]

É importante monitorizar os seguintes parâmetros: pressão, caudal, temperatura, nível de humidade, número de vezes que um dado equipamento é ligado/desligado. Os parâmetros referidos, podem ser monitorizados em diversas zonas de um sistema pneumático semelhante ao da figura 1.1. Por exemplo, é possível monitorizar junto dos atuadores pneumáticos, e/ou do reservatório. Estes parâmetros permitem saber o estado do sistema pneumático e planear manutenção preventiva. É importante referir que pressão excessiva pode provocar danos mecânicos, fugas podem provocar perdas de pressão e caudal no sistema, excesso de humidade pode provocar corrosão e danos no lubrificante [2], danos mecânicos e má lubrificação podem provocar temperatura excessiva e temperatura excessiva também pode provocar danos. Ao medir e comparar a pressão e o caudal em diversas zonas do sistema, pode-se identificar se há fugas, perdas de carga, etc... É importante contar o número de vezes que um dado equipamento é ligado/desligado, pois a grande maioria dos equipamentos possui um número limite de vezes que podem ser ligados/desligados, antes de ficarem danificados e deixarem de funcionar corretamente.

De modo a garantir um funcionamento adequado do sistema pneumático, é preciso monitorizar os parâmetros referidos previamente (pressão, caudal, humidade, temperatura em diversas zonas), de modo a ser possível implementar manutenção preventiva.

1.1 Enquadramento de um Sistema de Controlo e Monitorização

Uma solução consiste em utilizar *Programmable logic controllers* (PLCs) para monitorizar e controlar equipamentos. Por exemplo, um PLC ligado à rede local pode comandar e monitorizar um sistema pneumático. Por sua vez, o PLC pode receber instruções de comando de qualquer máquina também ligada à rede. Os dados podem ser registados num servidor de base de dados, ligado à rede. Os dados previamente registados podem ser acedidos a partir de máquinas também ligadas à mesma rede.

A partir do tratamento dos dados recolhidos, é possível estimar o estado do sistema pneumático e planear e implementar manutenções preventivas.

Em sistemas pneumáticos de baixa complexidade e extensão, uma alternativa à utilização de PLCs, pode passar pela utilização de sistemas baseados em microcontroladores como, por exemplo, a plataforma “open source” Arduino.

Estes sistemas disponibilizam uma plataforma que permite de uma forma simples, económica e flexível, funcionalidades de controlo e monitorização razoavelmente semelhantes às que poderiam ser realizadas com PLCs.

1.2 Objetivos da Dissertação

Nesta Dissertação, pretende-se implementar um sistema de controlo e monitorização para atuador pneumático que permita a aquisição e registo da informação em base de dados com possibilidade de acesso remoto.

Em vez de um PLC, pretende-se usar um microcontrolador (por ser mais económico e possuir funcionalidades razoavelmente semelhantes a um PLC), para fazer o controlo, aquisição de dados e monitorização de um sistema pneumático constituído por um cilindro de duplo efeito, com dois fins de curso, que é controlado por uma eletroválvula digital.

O sistema de controlo deve permitir controlar o número de movimentos de vai/vem do atuador, podendo ser ajustada uma temporização entre movimentos.

O sistema de monitorização deve permitir monitorizar a pressão, humidade e temperatura do ar comprimido em diferentes partes do circuito pneumático, bem como monitorizar os fins de curso.

O sistema a desenvolver deverá permitir a implementação de uma experiência de controlo remoto acessível a partir de qualquer computador ligado à rede local.

Deverá ainda ser analisado o comportamento do sistema pneumático para várias condições de funcionamento, ilustrando assim as potencialidades do sistema desenvolvido. Pretende-se analisar o tempo que o sistema demora a avançar/recuar e a evolução de pressão, temperatura e humidade junto das câmaras do cilindro.

Na figura 1.2, é possível visualizar a estrutura do sistema a desenvolver.

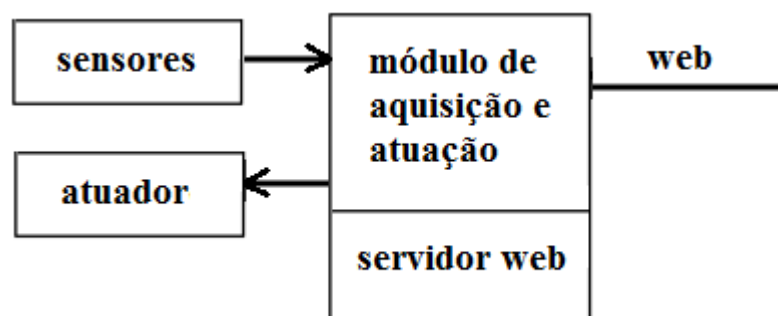


Figura 1.2: Estrutura do sistema a desenvolver

1.3 Estrutura da dissertação

Esta Dissertação está organizada em sete capítulos.

Para além da introdução, no capítulo 2 é feita uma breve apresentação de soluções já existentes no mercado para monitorização de sistemas pneumáticos.

No capítulo 3 são mencionados os componentes e a configuração da banca de testes utilizada.

No capítulo 4 é feita uma descrição do sistema de controlo e monitorização desenvolvido. No capítulo 5 é feita uma exposição da solução de interface, armazenamento e visualização de dados implementada.

No capítulo 6 são analisados os testes realizados para descrever o sistema desenvolvido.

No capítulo 7 são referidas as conclusões obtidas com o presente trabalho e uma lista de possíveis trabalhos futuros para quem tenha interesse na continuidade deste projecto.

2 Soluções de monitorização para sistemas pneumáticos

De modo a fazer a monitorização de sistemas pneumáticos, vários fabricantes desenvolveram várias soluções. Por exemplo, podem ser usados PLCs a recolher informação do sistema em causa, comunicando para um sistema com um software de monitorização remota.

Neste capítulo é feita uma breve apresentação de algumas soluções já existentes no mercado vocacionadas para monitorizar sistemas pneumáticos.

As soluções são ligeiramente diferentes, mas todas elas solucionam o problema em causa de monitorização de sistemas pneumáticos.

São dados exemplos de soluções de três fabricantes: Aventics, Festo e Bimba.

2.1 Aventics

O sistema *Smart Pneumatics Monitor* (SPM) desenvolvido pela Aventics [3], consiste num módulo que recebe informação do *Advanced Electronics System* (AES). As entradas/saídas (sinais de sensores e atuação de eletroválvulas) estão ligadas ao AES, que envia os dados para o SPM. O módulo SPM analisa sinais dos sensores existentes no sistema pneumático, conta o número de vezes que uma eletroválvula é ligada/desligada, conta o tempo que um cilindro demora a atingir uma dada posição e usa os resultados para gerar informação relacionada com o estado do sistema. O módulo SPM é ligado à internet, por *ethernet* ou sem fios, para enviar informação.

Na figura 2.1 é possível visualizar o SPM ligado ao AES, que por sua vez está ligado a eletroválvulas, sensores de pressão, caudal e posição. Também é possível visualizar a ligação do sistema SPM via internet.

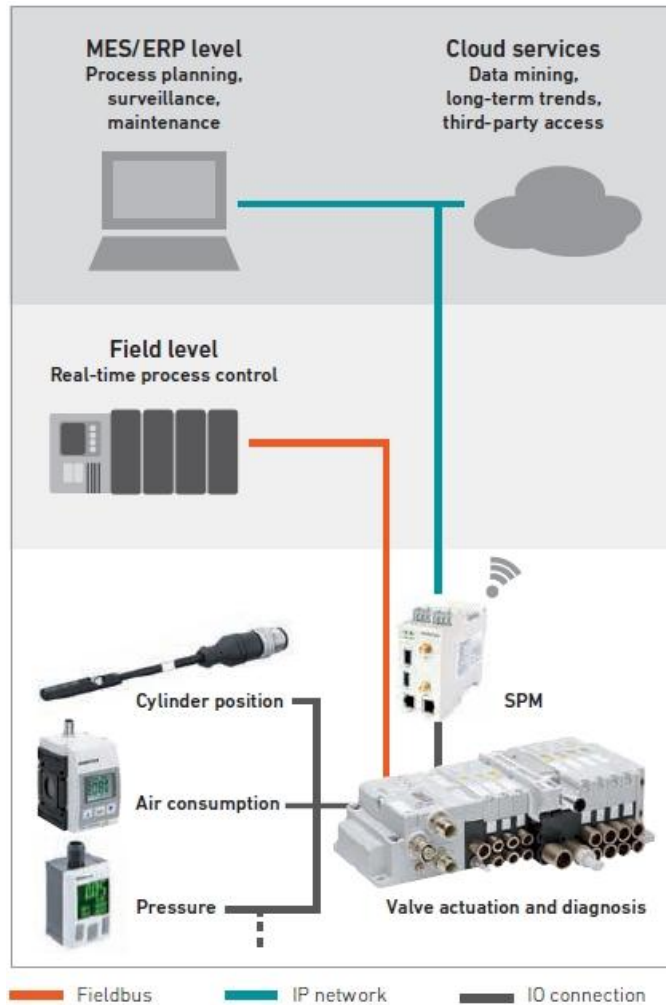


Figura 2.1: Sistema *Smart Pneumatics Monitor* da Aventics

Na figura 2.2, é possível visualizar um exemplo de aplicação com o sistema Smart Pneumatics Monitor.

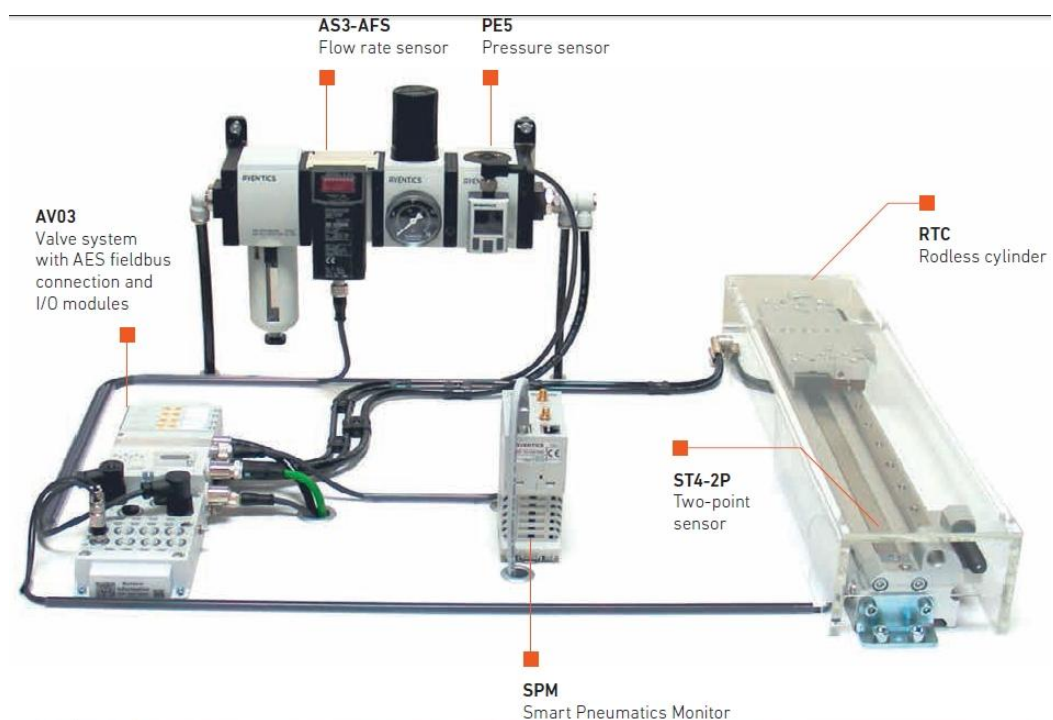


Figura 2.2: Exemplo com o Sistema *Smart Pneumatics Monitor*

O exemplo da figura 2.2 é composto por um cilindro pneumático sem haste com sensor de posição integrado, AES ligado à respetiva eletroválvula do cilindro, sensor de caudal e sensor de pressão integrados na unidade de tratamento de ar e módulo SPM com ligação ethernet.

O SPM usa os dados do sensor de posição do cilindro para analisar os tempos de amortecimento característicos do cilindro. Como o tempo em que decorre amortecimento diminui com o uso do amortecedor de um cilindro, é possível deduzir o nível de desgaste do amortecedor em função dos tempos de amortecimento. Quando um valor crítico é atingido, pode ser enviada uma mensagem para trocar de amortecedor.

Ao contar o número de ciclos de uma válvula, é possível ter uma ideia da proximidade do seu fim de vida. Pode ser efetuada manutenção preventiva, antes de a válvula falhar. Consumos excessivos de ar em certas zonas ou em determinados instantes (ex: quando uma válvula é atuada) podem indicar fugas de ar.

2.2 Festo

O *System Diagnostics* da Festo [4] é uma aplicação que pode ser instalada no sistema CPX-FEC (PLC modular), permitindo a recolha e tratamento de informação de vários sensores e atuadores distribuídos num sistema pneumático, fornecendo um diagnóstico do estado do respetivo sistema pneumático.

Na figura 2.3 é possível visualizar um sistema da Festo, onde pode ser implementado o *System Diagnostics*.

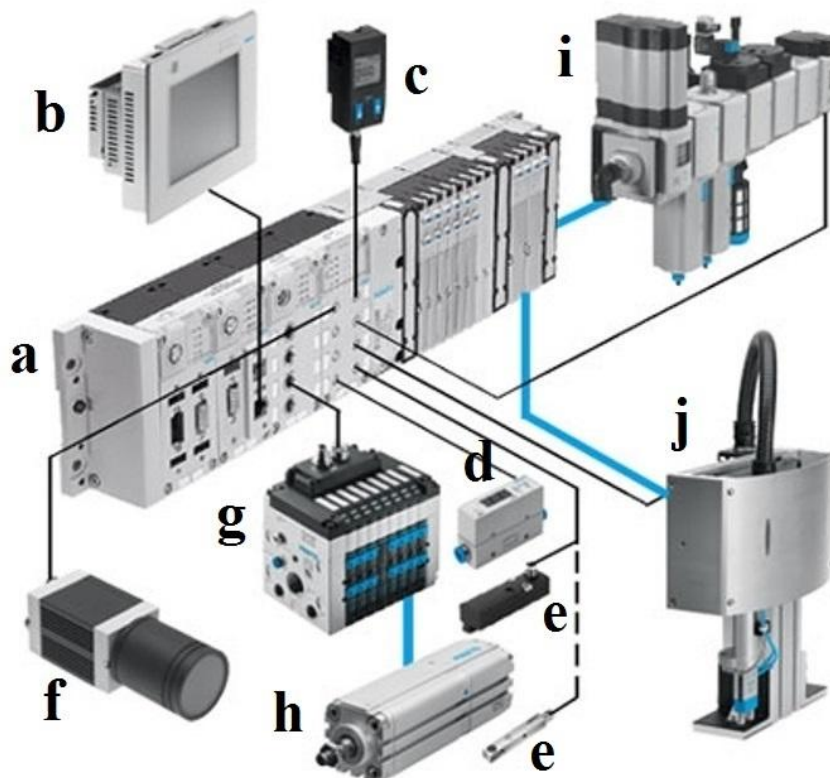


Figura 2.3: Sistema da Festo, onde pode ser implementado o *System Diagnostics*

O sistema anterior é composto pelo sistema CPX-FEC (a), uma *Human machine interface* (HMI) (b), um sensor de pressão (c), um sensor de caudal (d), sensores de posição para atuadores (e), um sistema de visão (f), terminais de válvulas (g), um cilindro pneumático (h), um regulador de pressão elétrico (i) e um módulo *pick-and-place* (j).

Com software de comunicação, a informação do diagnóstico é disponibilizada para uma rede, HMI, PC ou outro dispositivo. É possível visualizar os valores de sensores e estado de atuadores, visualizar valores previamente registados e monitorizar componentes específicas do sistema. Assim, é fácil identificar o que está a funcionar de modo incorreto. Também podem ser visualizados tempos de comutação de válvulas, de atuadores e o seu número de movimentos.

Existe ainda um pacote de monitorização energética que é dirigido à monitorização de pressão, caudal e consumo de ar no sistema pneumático. Os valores lidos são comparados com valores de referência (obtidos perante condições “ideais”) para avaliar o desempenho do sistema.

2.3 Bimba

O sistema *IntelliSense®* da Bimba [5] é uma plataforma que combina cilindros, sensores e software, de modo a recolher valores de pressão e temperatura em cilindros pneumáticos e enviar posteriormente a PCs ou PLCs.

A partir de um par de sensores de pressão e temperatura, o sistema *IntelliSense®* é capaz de reportar vários dados, incluindo a condição do cilindro, tempos de avanço/recuo, pressão e temperatura.

Na figura 2.4, é possível visualizar o sistema *IntelliSense®* da Bimba para recolha e armazenamento de dados, monitorização remota e rede modbus.

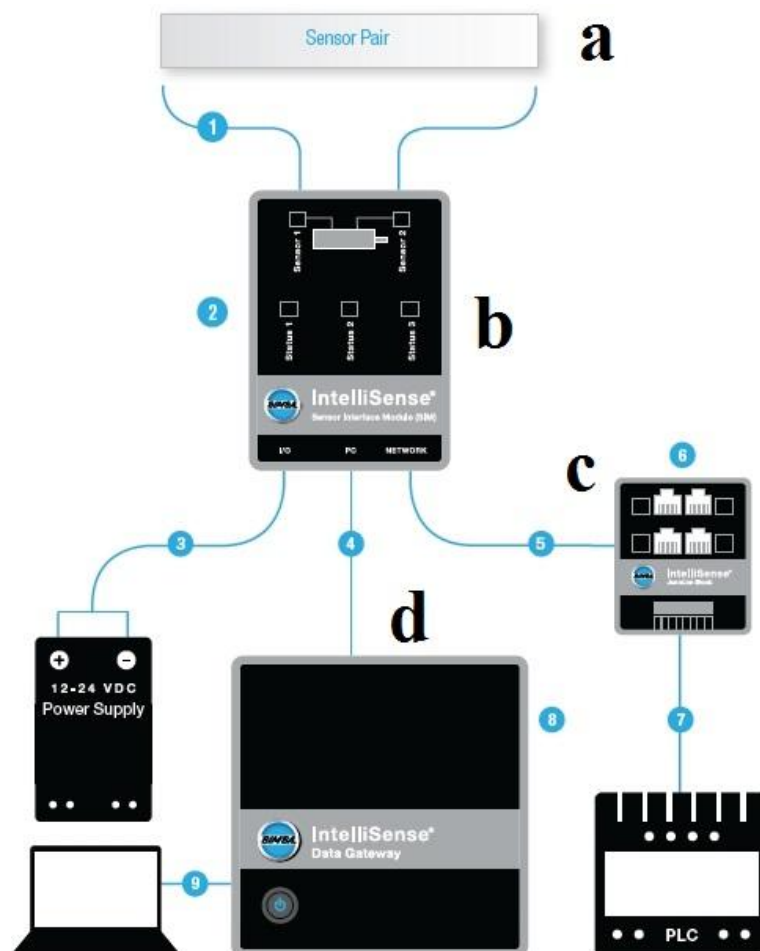


Figura 2.4: Sistema *IntelliSense®* da Bimba

Reportando à figura 2.4, o sistema é composto por um par de sensores que leem pressão e temperatura num cilindro pneumático (a), um módulo de interface do respetivo par de sensores (b), um bloco de junção IntelliSense® (que pode ser ligado a PLCs por modbus *Remote terminal unit* (RTU), enviando dados de desempenho do cilindro e alertas) (c) e uma “Gateway” de dados IntelliSense® (d) que pode ser ligada a uma rede (via *ethernet* ou sem fios) e que pode ser acedida por computadores e outros dispositivos.

Os valores de vários módulos podem ser visualizados em tempo real, armazenados na “Gateway” e enviados pela internet para serem visualizados por vários utilizadores em qualquer local.

O sistema também permite visualizar o nº de ciclos realizados por um cilindro, o nº de ciclos que restam até ao fim de vida do cilindro, uma estimativa do tempo de vida, tempo que um ciclo demora a ser realizado, etc... permitindo implementar um planeamento de manutenção.

2.4 Síntese

Os três sistemas descritos anteriormente são vocacionados para aplicações industriais permitindo a monitorização de sistemas pneumáticos em tempo real e a visualização e análise de valores previamente registados. O sistema Smart Pneumatics Monitor da Aventics consiste num módulo SPM que recolhe e disponibiliza informação de um módulo AES sobre o sistema pneumático em causa. O System Diagnostics da Festo consiste em software que pode ser implementado no sistema CPX-FEC, recolhendo informações de diversos sensores e atuadores. O sistema IntelliSense® da Bimba consiste em sensores de pressão e temperatura, um módulo para cada par de sensores e uma “Gateway” para armazenamento de dados, não necessitando de ser integrado com um sistema de controlo específico.

A disponibilidade destes sistemas comerciais permite a implementação de soluções de monitorização de diversas variáveis num sistema pneumático (tais como pressão, caudal, posição e temperatura), a avaliação da eficiência energética e estimar o tempo de vida do equipamento. Monitorizar a pressão é importante para saber se está de acordo com valores especificados. A temperatura também é importante monitorizar porque pode estar associada a má lubrificação e danos no sistema. Também é importante monitorizar a humidade, pois pode provocar corrosão e danos no lubrificante. É importante mencionar que a eficiência energética também pode ser avaliada a partir da leitura dos valores de pressão em várias zonas do sistema. O fim de vida de certos equipamentos pode ser estimado, contando o nº de vezes que são ligados ou desligados. Os dados devem ser armazenados numa base de dados, de modo a ser possível visualizar e analisar dados previamente registados. O sistema que monitoriza dados e o que armazena os dados, devem estar ligados em rede para poderem ser acedidos remotamente.

3 Descrição da Banca de teste

Como referido, pretende-se implementar um sistema de controlo, aquisição e monitorização para um sistema pneumático que permita a aquisição e registo da informação em base de dados com possibilidade de acesso remoto, baseado em microcontrolador.

Na figura 3.1, é possível visualizar o esquema do sistema pneumático utilizado. O sistema pneumático em causa é constituído por um cilindro de duplo efeito (a), simétrico, de êmbolo magnético e com dois fins de curso (b). Existem ainda duas válvulas restritoras de caudal (c), unidireccionais, montadas diretamente no corpo do cilindro. O cilindro é controlado por uma eletroválvula (d) de cinco orifícios, duas posições e monoestável. Está disponível uma válvula reguladora de pressão de ajuste manual (e) que permite ajustar a pressão no sistema. São utilizados três sensores de pressão (um à saída da válvula reguladora e os outros dois, na entrada de cada câmara do cilindro) (f). O sensor de temperatura e humidade (g) está colocado na linha de alimentação de uma das câmaras do cilindro.

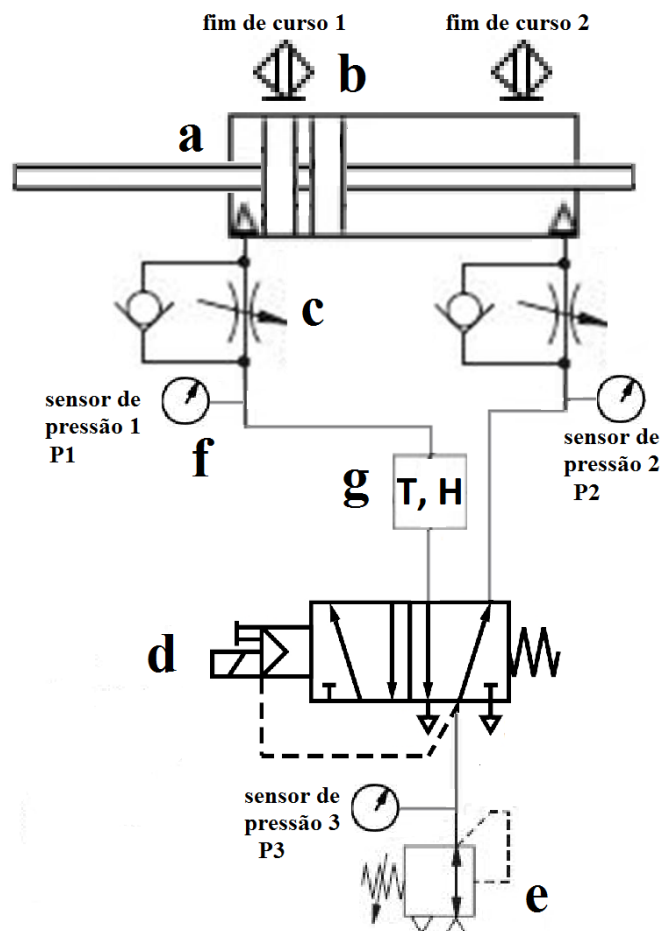


Figura 3.1: Sistema Pneumático utilizado

3.1 Cilindro pneumático

Na figura 3.2 é possível visualizar o cilindro pneumático utilizado. Está a ser usado um cilindro pneumático de duplo efeito, simétrico e com êmbolo magnético (Festo, referência 193991 [6]). O êmbolo tem um diâmetro de 25 mm, o cilindro tem um curso de 100 mm e uma haste com diâmetro de 10 mm. O cilindro suporta uma pressão máxima de 10 bar.



Figura 3.2: Cilindro Pneumático Festo 193991

3.2 Válvula direcional

Na figura 3.3 é possível visualizar a eletroválvula utilizada. De modo a controlar o cilindro pneumático, é usada uma eletroválvula direcional monoestável com retorno por mola, assistência pneumática, com cinco orifícios e duas posições (Joucomatic, 55192009 [7]). A eletroválvula deve ser alimentada com uma tensão de 24 V DC, consumindo 2,5 W quando está atuada. Funciona com uma pressão manométrica mínima de 2 bar e máxima de 10 bar. Os seus orifícios têm um diâmetro de 1/4". A válvula permite um caudal máximo de 860 l/min (pressão de 6 bar).



Figura 3.3: Eletroválvula Joucomatic 55192009

3.3 Fins de curso

Na figura 3.4 é possível visualizar o fim de curso utilizado. Para indicar as posições extremas do cilindro foram utilizados dois fins de curso do tipo *Reed Switch* (SMC, referência D-A73 [8]), um na 1ª extremidade (fim de curso 1) e outro na 2ª (fim de curso 2). É possível ajustar manualmente a posição dos fins de curso, mas foram usados sempre na posição mais extrema possível. O contacto ferromagnético dos fins de curso é atuado na presença de um campo magnético (neste caso, disponibilizado pelo íman presente no êmbolo do cilindro), disponibilizando um sinal digital. Os fins de curso suportam 24 V DC. Neste caso, os fins de curso são alimentados a 5 V. Os fins de curso têm um tempo de operação de 1,2 ms.



Figura 3.4: Fim de curso SMC D-A73

3.4 Sensores de pressão

Na figura 3.5 é possível visualizar o sensor de pressão utilizado. De modo a ler os valores de pressão do ar comprimido, são usados três sensores de pressão (SMC, ISE40A [9]). Um para a 1ª câmara-de-ar comprimido (P1), outro para a 2ª (P2) e outro após a válvula reguladora (P3). Estes sensores permitem ler uma pressão manométrica entre -1 e 10 bar.



Figura 3.5: Sensor de pressão SMC ISE40A

Estes sensores devem ser alimentados com uma tensão entre 12 e 24 V. O sensor disponibiliza o valor de pressão manométrica num *display* e uma saída analógica em tensão entre 0.6 e 5 V linearmente proporcional ao valor de pressão manométrica lida, com um tempo de resposta de 2,5 ms, uma exatidão de $\pm 2,5\%$ do valor de pressão máximo e uma linearidade de $\pm 1\%$ (ou menos) do valor de pressão máximo.

Para caracterizar os sensores de pressão, foi efetuado um conjunto de medições, apresentados na Tabela 3.1. Os sensores que estão antes das câmaras do cilindro são denominados por P1 e P2 e o sensor que está antes da eletroválvula por P3. Foram manualmente ajustados sete níveis de pressão, 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 6 bar. Para cada valor de pressão, é registado o valor lido no manómetro da válvula reguladora, no *display* de cada sensor de pressão e o valor de tensão disponibilizado por cada sensor de pressão, lido com um multímetro.

Tabela 3.1: Medições de pressão e tensão

Válvula reguladora de pressão [bar]	P1		P2		P3	
	Display [bar]	Tensão [V]	Display [bar]	Tensão [V]	Display [bar]	Tensão [V]
0	0,01	1,003	0,02	1,002	0,02	0,998
1	1,14	1,454	1,15	1,455	1,15	1,453
2	2,18	1,866	2,18	1,868	2,19	1,864
3	3,07	2,221	3,07	2,224	3,08	2,222
4	4,05	2,613	4,05	2,616	4,06	2,615
5	5,03	3,004	5,03	3,008	5,04	3,009
6	5,93	3,364	5,93	3,370	5,94	3,372

Ao conjunto de valores obtidos foi ajustada uma regressão linear, tendo sido obtidas as funções: $y_1 = 0,399 x - 0,998$, $y_2 = 0,401 x - 0,994$ e $y_3 = 0,401 x - 0,989$ para cada sensor, sendo “y” o valor de tensão (V) e “x” a pressão (bar).

Para estas funções, o coeficiente de correlação é $r = 1,00$. Logo, pode-se assumir que a característica tensão = f (pressão) é aproximadamente linear (para o intervalo de valores em causa).

3.5 Sensor de humidade e temperatura

Para a medição de humidade e temperatura foi utilizado um sensor integrado (BME280 da Bosch [10]). Este sensor também permite a medição de valores de pressão atmosférica. Como a leitura de pressão é apenas para valores atmosféricos, apenas vão ser usados os valores de temperatura e humidade. O sensor BME280 está disponível numa placa de circuito impresso da Adafruit [11]. Os valores de humidade relativa lidos são para valores de pressão

atmosféricos, portanto não é tido em conta que aumentos de pressão muito elevados (acima de valores atmosféricos) podem afetar valores de humidade relativa. De acordo com a Bosch, o sensor de humidade tem um tempo de resposta de 1 segundo, exatidão de $\pm 3\%$ e resolução de $0,008\%$ e o sensor de temperatura tem uma exatidão de $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. O fabricante diz que o sensor pode suportar uma pressão de cerca de 20 bar.

De modo a este sensor ser integrado no circuito pneumático, foi necessário um encapsulamento. O encapsulamento deve suportar as pressões utilizadas em pneumática, não acrescentar fugas de ar e não acrescentar um grande volume de ar morto ao sistema pneumático. Foi utilizado o corpo de um cilindro pneumático pequeno para servir de encapsulamento, por cumprir parte dos requisitos previamente referidos. Também é importante mencionar que o corpo do cilindro utilizado tem um diâmetro de 20 mm e um comprimento de 50 mm.

Testes iniciais com o sensor permitiram identificar a influência do volume de ar presente com o encapsulamento. De modo a reduzir este volume de ar morto foi aplicada cortiça para preenchimento do espaço interior do encapsulamento. As ligações pneumáticas ao corpo do cilindro são feitas conforme ilustrado na figura 3.6.a. As ligações eléctricas utilizam um dos orifícios já existentes no corpo do cilindro utilizado. Este encapsulamento permite montar o sensor em linha com a alimentação pneumática ou em alternativa em derivação (figura 3.6 b). A solução adotada consistiu em montar o sensor em linha antes da câmara do cilindro.



Figura 3.6.a: Encapsulamento com o sensor de humidade e temperatura

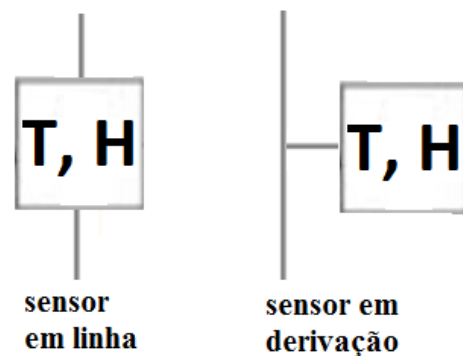


Figura 3.6.b: Possíveis configurações do sensor

3.6 Síntese

Neste capítulo foram apresentados os componentes e a configuração da banca de teste.

Neste sistema, foram utilizados diversos equipamentos típicos utilizados em pneumática, um cilindro pneumático de duplo efeito, uma eletroválvula monostável 5/2, dois fins de curso, três sensores de pressão com saída analógica em tensão e um sensor de humidade e temperatura.

4 Desenvolvimento do Sistema de controlo e monitorização

O sistema de controlo e monitorização do sistema pneumático tem como requisitos, adquirir e processar os sinais provenientes dos sensores utilizados, comandar a eletroválvula do cilindro pneumático e disponibilizar dados remotamente.

Para implementar este sistema foi escolhida a plataforma Arduino que disponibiliza uma solução baseada em microcontroladores ATmega e um conjunto de periféricos que permitem dispor de interfaces, quer para sensores e atuadores, quer para ligação a rede local. É uma solução menos robusta e com menor capacidade de expansão que um PLC, mas que constitui uma solução funcionalmente viável, económica e disponível no laboratório.

Para recolher dados e enviar comandos foi optado por ligar o microcontrolador à rede local, de modo a ser possível aceder aos dados e enviar comandos a partir de qualquer máquina ligada à rede. Os dados são guardados numa base de dados instalada num computador também ligado à rede local.

A arquitetura global do sistema de controlo e monitorização consiste num microcontrolador ligado aos sensores referidos previamente, um módulo de relés para ativar a eletroválvula e um módulo web para ligar o sistema à rede local.

Na figura 4.1, é possível visualizar um esquema do sistema de controlo e monitorização implementado.

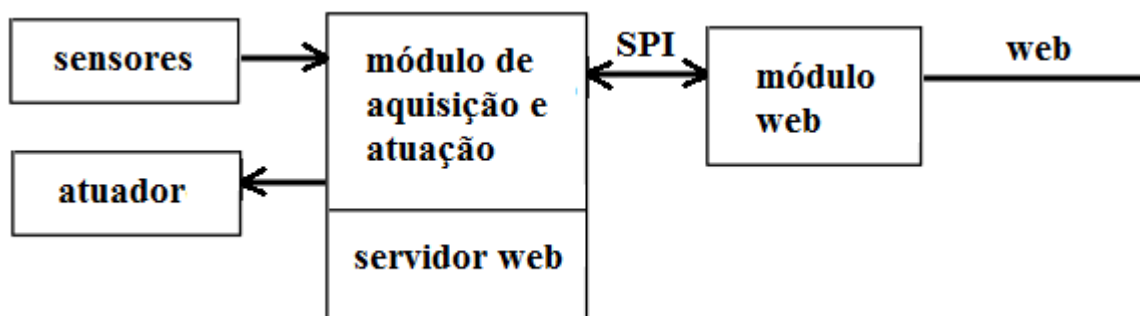


Figura 4.1: Sistema de controlo e monitorização

4.1 Microcontrolador

Para controlar/monitorizar o sistema pneumático, é usado um microcontrolador Arduino Uno R3 [12]. O microcontrolador possui entradas/saídas digitais que podem ser configuradas. Também contém seis entradas analógicas, onde podem ser aplicados sinais entre 0 e 5 V (o conversor A/D tem uma resolução de 10 bits). O microcontrolador suporta comunicação *Inter*

Integrated circuit (I2C), que é usada no sensor de humidade e temperatura em causa e comunicação *Serial Peripheral interface* (SPI), que é usada no módulo web. Existem entradas/saídas que podem ser configuradas para disponibilizar um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM). A programação é possível através do software *Arduino Integrated Development Environment* (IDE), sendo transferida para o microcontrolador através da porta *Universal Serial Bus* (USB). O sistema também é capaz de disponibilizar 5 V e GND. Cada entrada/saída digital pode fornecer/receber um máximo de 40 mA com 5 V. O Arduino pode ser alimentado com uma fonte DC (7 a 12 V) ou a partir de uma porta USB (5V). Na figura 4.2 é possível visualizar um diagrama do microcontrolador Arduino Uno.

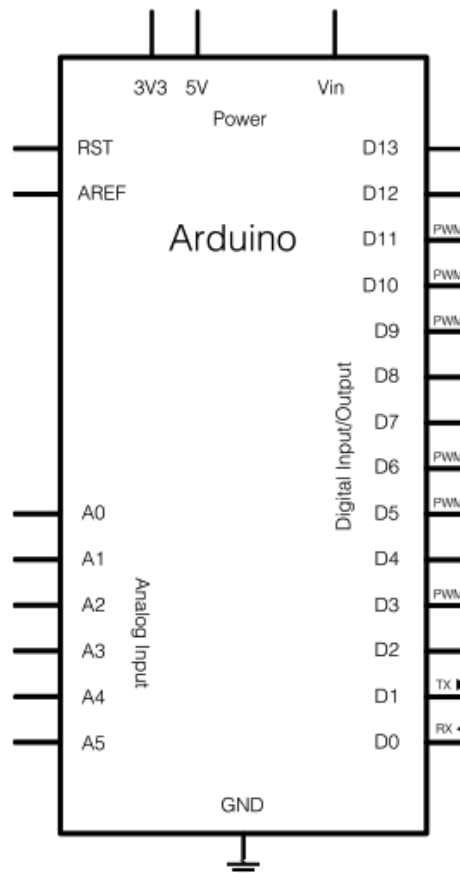


Figura 4.2: Arduino Uno

4.2 Comando do atuador

A eletroválvula utilizada necessita de uma alimentação elétrica de 24 V DC, pelo que é necessário dispor de um relé de interface controlado por uma saída digital do Arduino.

É usado um módulo de 4 relés concebido para o Arduino (Arduino 4 Relays Shield [13]). O sistema é constituído por relés (Finder série 30.22 [14]) com um tempo de operação de 6 ms e de retorno de 2 ms. Os contactos dos relés podem funcionar com uma corrente máxima de 2 A, para 30 V DC. A bobina de cada relé consome cerca de 40 mA, para os 5 V do microcontrolador.

São usados díodos de proteção nos relés e na eletroválvula, de modo a evitar picos de tensão induzidos em bobinas quando a corrente é subitamente interrompida.

Na figura 4.3, é possível visualizar o esquema de comando da eletroválvula.

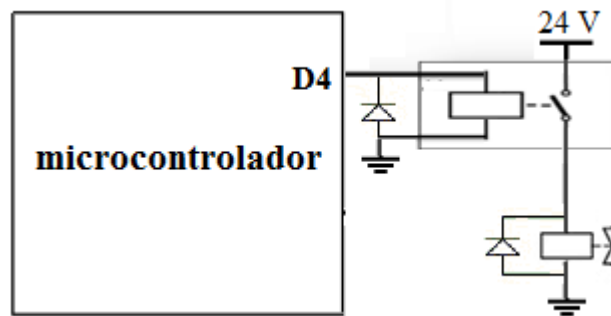


Figura 4.3: Esquema de comando da eletroválvula

4.3 Condicionamento de sinal dos sensores

São utilizados diversos sensores, sendo necessário dispor de condicionamento de sinal em alguns deles. Os sensores de pressão disponibilizam um sinal em tensão compatível com o intervalo de valores que o microcontrolador lê, portanto não é preciso condicionar o sinal.

Tratando-se de um sistema integrado, o sensor BME280 já possui condicionamento de sinal. Este sensor suporta comunicação I2C e SPI, mas vai ser utilizada comunicação I2C. É importante referir que a comunicação I2C suporta vários “mestres” (neste caso, é usado um microcontrolador) e vários “escravos” (neste caso, é usado um sensor BME280) com diferentes endereços. A informação é enviada e recebida pela linha *Serial data line* (SDA), neste sensor representada por SDI e o sinal de sincronização é enviado pelo microcontrolador pela linha *Serial clock line* (SCL), neste sensor representada por SCK.

Os fins de curso precisam de utilizar resistências *pull-down* ou *pull-up* para serem ligados a entradas digitais. Foram usadas resistências de *pull-down*.

Na figura 4.4, é possível visualizar um esquema do microcontrolador, sensores utilizados e respetivos condicionamentos de sinal.

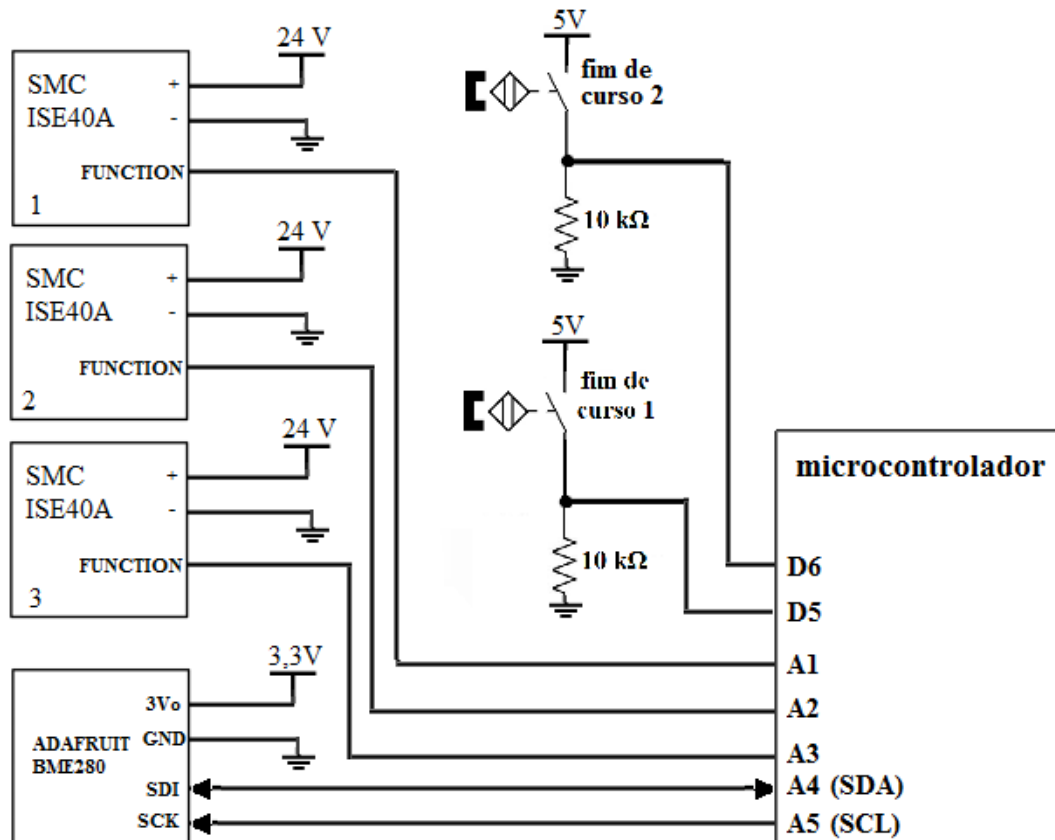


Figura 4.4: Microcontrolador, sensores utilizados e condicionamentos de sinal

O uso da comunicação I2C pode permitir a utilização de outros dispositivos que suportem este tipo de interface. Seria possível, por exemplo, utilizar mais sensores de humidade e temperatura em zonas diferentes com endereços diferentes, por comunicação I2C.

4.4 Módulo web

Para ligar o microcontrolador à rede local, é usado um módulo web (Arduino Ethernet Shield 2 [15]) concebido para o Arduino. A comunicação entre o Arduino e o módulo web é efetuada através do protocolo SPI. É importante referir que este tipo de comunicação suporta apenas um “mestre” (neste caso, o microcontrolador) e vários “escravos” (neste caso, é usado um módulo web). O sinal de sincronização é enviado pelo “mestre” pela linha *Serial clock* (SCK), o “mestre” recebe a informação pela linha *Master in Slave out* (MISO), envia a informação pela linha *Master out Slave in* (MOSI) e a linha *Slave select* (SS) permite selecionar o respetivo “escravo”.

Está a ser usado um módulo web com endereço *Media Access Control* (MAC) 0x90, 0xA2, 0xDA, 0x11, 0x05, 0x0E. O endereço MAC é único para cada interface de comunicação em dispositivos de rede e é usado para controlo de acesso em redes de computadores.

Na figura 4.5 é possível visualizar a ligação entre o microcontrolador e o módulo web utilizados.

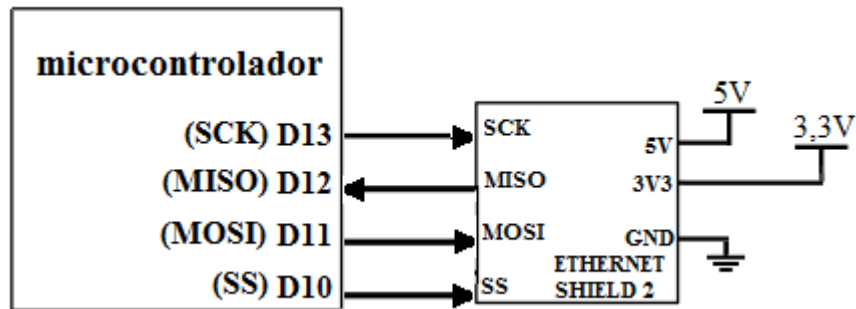


Figura 4.5: Microcontrolador e interligação ao módulo web

4.5 Algoritmo de controlo

O algoritmo implementado permite controlar o número de movimentos de vai/vem do atuador pneumático em função dos fins de curso, com tempo ajustável entre movimentos, definidos na interface do utilizador. Um movimento consiste num “avanço” ou num “recuo” do cilindro. O número de movimentos foi denominado por $N1$ e o valor do tempo entre cada movimento por $T1$. Por defeito, o valor do tempo é de 0 ms.

Na figura 4.6 é possível visualizar gráficos de comando e posição do cilindro, para 2 movimentos ($N1 = 2$). À esquerda é possível visualizar uma situação com tempo entre movimentos ($T1 > 0$) e à direita sem tempo entre movimentos ($T1 = 0$). Em cima, é possível visualizar a posição do cilindro e em baixo o sinal de comando do atuador.

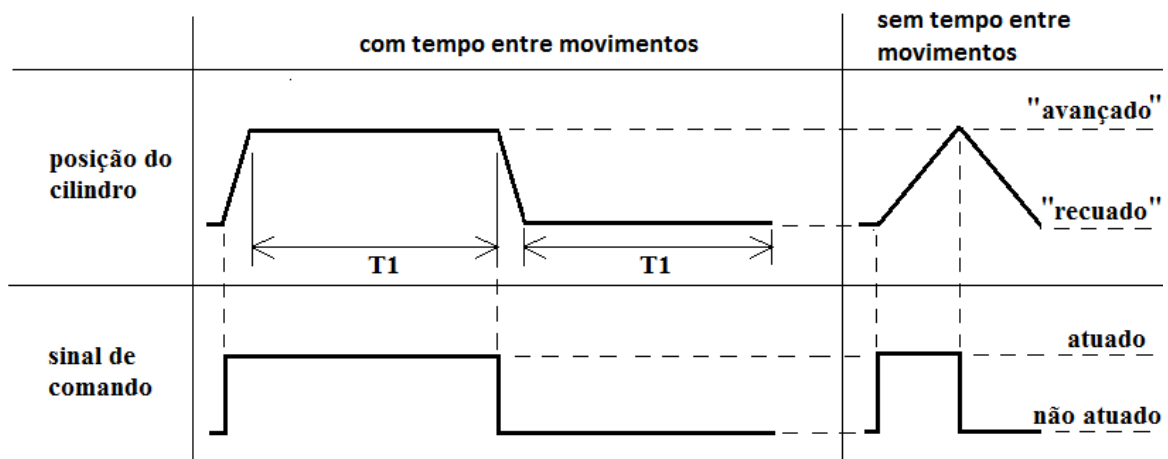


Figura 4.6: Gráficos de comando do atuador e posição do cilindro

Foram feitas experiências que efetuavam 1000 conjuntos de leituras e envios de dados, tendo sido realizados num tempo de cerca de 27 segundos. O programa permite assim fazer uma aquisição e registo de dados a uma frequência de aproximadamente 37 Hz, para cada valor em causa. De notar que cada conjunto de leituras e envios é composto por três valores de pressão, estado dos dois fins de curso, valores de temperatura e humidade, número de movimentos e estado de atuação da electroválvula.

Na figura 4.7, é possível visualizar um fluxograma que representa o funcionamento do algoritmo de controlo utilizado. O sistema efetua leituras e envios quer durante o movimento do cilindro quer enquanto se encontra imobilizado numa dada posição extrema, durante o intervalo de tempo $T1$.

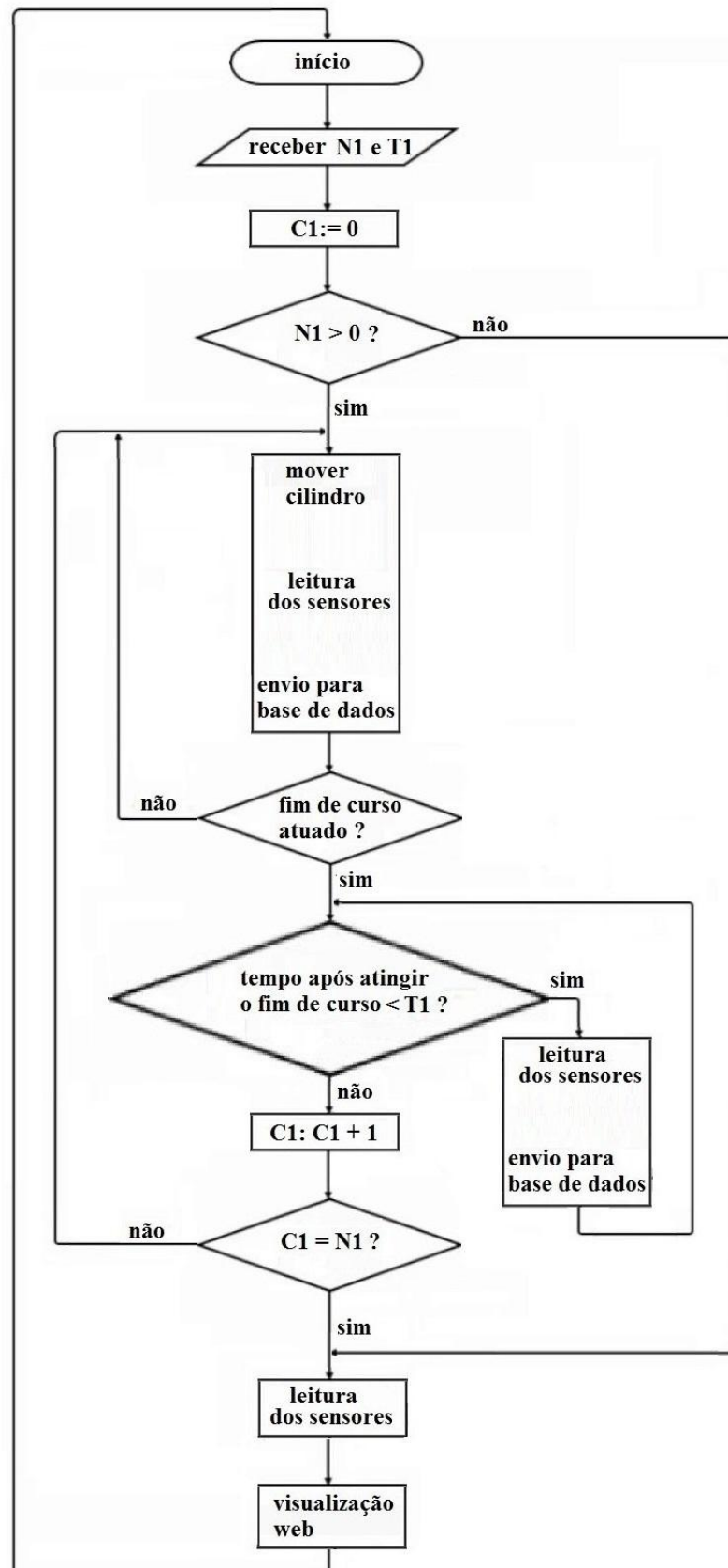


Figura 4.7: Fluxograma do algoritmo de controlo

4.6 Síntese

Neste capítulo foram apresentados os componentes do sistema de controlo e monitorização.

O controlo e a monitorização são efetuados por um único microcontrolador, um microcontrolador Arduino Uno. O comando da eletroválvula é feito por um relé atuado por uma saída digital do microcontrolador. Os sensores de pressão disponibilizam um sinal analógico em tensão que é lido pelas entradas analógicas do microcontrolador. Os fins de curso são lidos por entradas digitais. O sensor de humidade e temperatura comunica com o microcontrolador por comunicação I2C. O microcontrolador está conectado à rede local por um módulo web, que comunica com o microcontrolador por comunicação SPI.

O programa desenvolvido permite definir o número de movimentos e ajustar um tempo entre movimentos (ou seja, o tempo que o cilindro fica parado numa das suas posições extremas), a partir de uma página web.

Os dados recolhidos são enviados para uma base de dados instalada num computador da rede local.

5 Solução de interface, armazenamento e visualização de dados

O controlo/monitorização do sistema pneumático é feito via web, a partir do *browser* de um computador ligado à mesma rede local a que o microcontrolador Arduino está ligado. De modo a receber comandos via web, o microcontrolador disponibiliza um servidor web ligado à rede local.

O armazenamento de dados é feito via web para uma base de dados, disponibilizada num computador da rede local. Para armazenar dados foi escolhido o programa *Wampserver* porque, para além de ser adequado para o sistema operativo *Windows*, tem incluído *MySQL* e *Hypertext Preprocessor* (PHP). *MySQL* é uma base de dados de alta velocidade e PHP é uma linguagem que permite aceder a dados da base de dados.

Na figura 5.1, é possível visualizar a troca de informação na rede local.

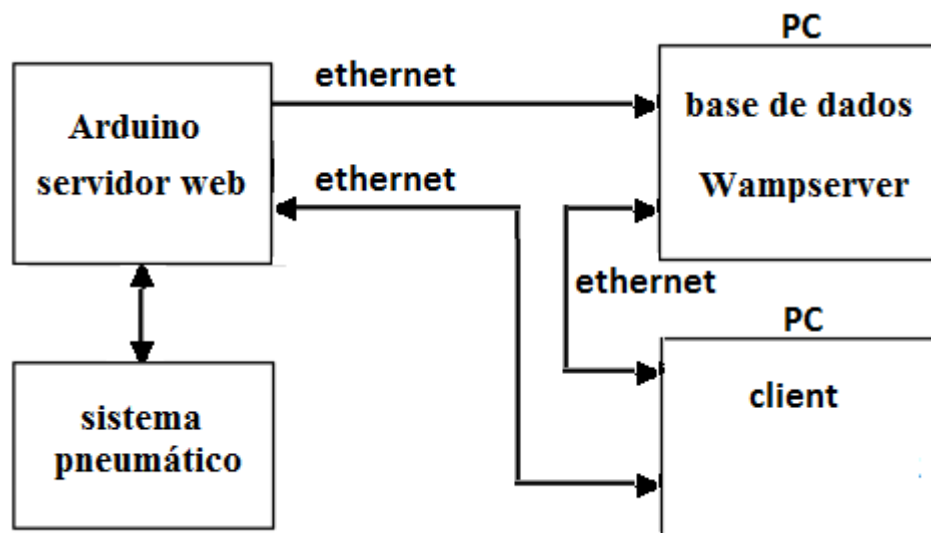


Figura 5.1: Troca de informação na rede local

5.1 Interface com o utilizador

O utilizador tem disponível uma página web para aceder à interface de controlo e monitorização do sistema pneumático.

A partir da barra de endereços do *browser* (num computador da rede local), pode-se aceder à página web disponibilizada pelo microcontrolador Arduino. A partir dessa página web, o utilizador pode definir o número de movimentos para o cilindro pneumático “avançar/recuar” e o tempo entre movimentos. Também é possível visualizar os últimos valores dos sensores.

Foram ainda incluídos o estado do comando de acionamento do relé da eletroválvula e um contador do nº de movimentos realizados desde que o programa é inicializado.

Na figura 5.2 é possível visualizar a página web para interface com o utilizador.

http://192.168.121.177/

Sistema de monitorização e controlo para atuador pneumático

Inserir movimentos: (0-32767)

tempo (ms) entre movimentos: (0-32767)

pressao1 0.03 bar
pressao2 2.28 bar
pressao3 2.28 bar
fimdecorso1 1
fimdecorso2 0
temperatura 25.04 °C
humidade 49.40 %
contador 0
comando 0

Figura 5.2: Página web para interface com utilizador

5.2 Armazenamento de dados

Para o armazenamento de dados, foi instalada e configurada uma base de dados (programa *Wampserver*) num computador da rede local. Na mesma base de dados, foi criada uma tabela para cada variável a monitorizar.

Na figura 5.3 é possível visualizar a base de dados utilizada.

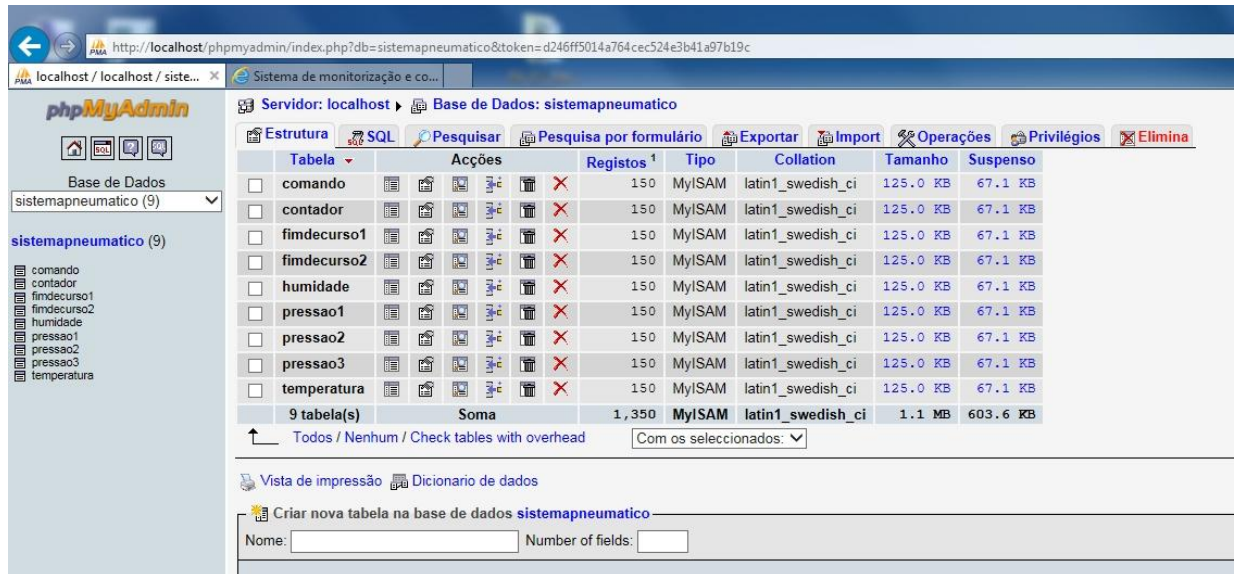


Figura 5.3: Base de dados

Para cada valor, é incluída a data em que foi enviado e uma ID auto-incrementada após cada conjunto de leituras que permite identificar e distinguir os dados. Os parâmetros de um dado conjunto de leituras, possuem o mesmo ID.

Na figura 5.4 é possível visualizar a tabela utilizada (por exemplo) para armazenar os valores de pressão na câmara 1.

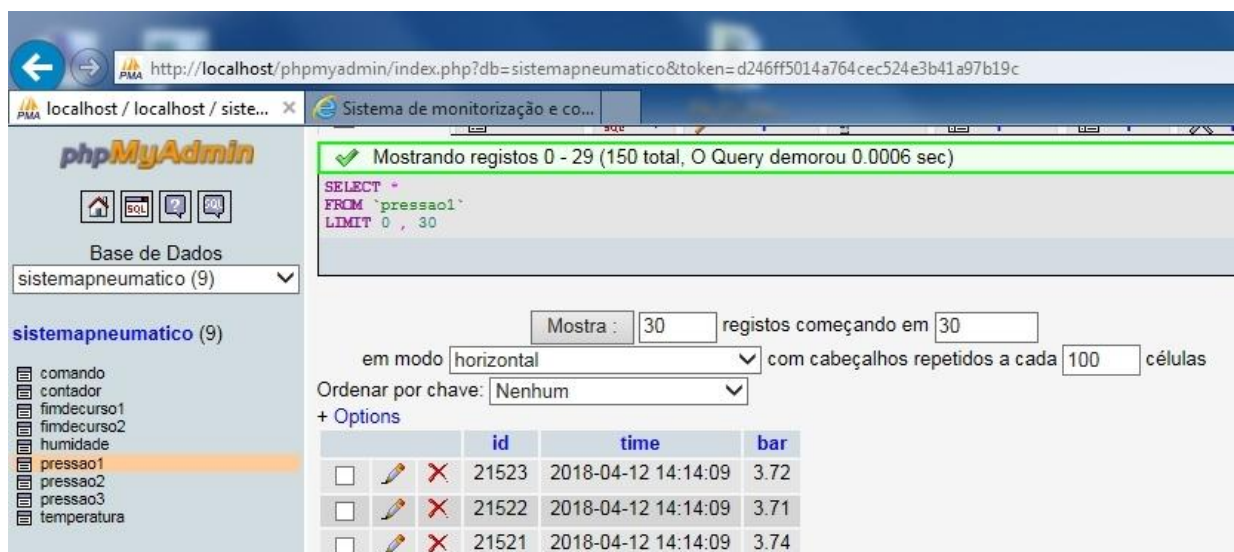



Figura 5.4: Tabela de pressão na câmara 1

5.3 Visualização de dados

Os dados registados na base de dados podem ser consultados através do browser, em qualquer computador da rede local. Para esse efeito foram criados programas PHP que permitem visualizar os valores em páginas web. Na lista de valores, pode-se visualizar a data em que os valores foram enviados e a respectiva ID. Os valores mais recentes ficam automaticamente no topo da lista.

Na figura 5.5 é possível visualizar a página web disponibilizada para visualizar (por exemplo) os valores de pressão na câmara 1.



The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying 'http://192.168.121.58/pressao1get_data.php'. The browser tabs include 'localhost / localhost / sistema...', 'Sistema de monitorização e co...', and 'pressao1'. The main content area is titled 'pressao1' and contains a table with three columns: 'ID', 'Timestamp', and 'bar'. The table lists three rows of data, with the most recent at the top.

ID	Timestamp	bar
21523	2018-04-12 14:14:09	3.72
21522	2018-04-12 14:14:09	3.71
21521	2018-04-12 14:14:09	3.74

Figura 5.5: Valores de pressão na câmara 1

Também foram feitos programas PHP, de modo a ser possível ter acesso a um relatório dos valores guardados, num ficheiro de formato Excel, através do browser, em qualquer computador da rede local.

De modo a ser possível limpar a base de dados em qualquer computador da rede local (e não apenas no computador com privilégios administrativos em que o programa Wampserver está instalado), foi feito um programa PHP que permite fazer a limpeza a partir de um comando no *browser*. O programa de limpeza também faz reset ao valor da ID.

O Anexo A lista os endereços que permitem aceder a cada um dos parâmetros, disponíveis na base de dados.

5.4 Síntese

Neste capítulo foram apresentadas a interface, monitorização e aquisição de dados.

A interface consiste numa página web para controlar e monitorizar o sistema. Para armazenar os dados, é usada uma base de dados instalada num computador ligado à rede local. Os dados podem ser consultados, guardados ou apagados a partir da barra de endereços do *browser* de um computador ligado à rede local.

6 Testes do sistema desenvolvido

6.1 Caracterização dos valores de pressão

Como já foi referido, o conversor A/D do microcontrolador utilizado tem 10 bits, portanto os valores disponibilizados vão estar entre 0 e 1023. Os valores de pressão manométrica, dos sensores, estão entre -1 e 10 bar. A resolução de 10 bits é suficiente para visualizar a evolução de pressão com resolução de cerca de 10 mbar. Para caracterizar os valores disponibilizados pelo conversor A/D do microcontrolador, foi efetuado um conjunto de medições, apresentados na Tabela 6.1:

Tabela 6.1: Medições de pressão e valores do microcontrolador

Válvula reguladora de pressão [bar]	P1		P2		P3	
	Display [bar]	Valor Arduino [0, 1023]	Display [bar]	Valor Arduino [0, 1023]	Display [bar]	Valor Arduino [0, 1023]
0	0,01	210	0,02	210	0,02	210
1	1,14	305	1,15	306	1,15	306
2	2,18	391	2,18	392	2,19	392
3	3,07	466	3,07	467	3,08	467
4	4,05	548	4,05	549	4,06	549
5	5,03	633	5,03	633	5,04	634
6	5,93	707	5,93	708	5,94	708

Para uma regressão linear, obteve-se as funções: $y_1 = 0,0119 x - 2,48$, $y_2 = 0,0119 x - 2,47$ e $y_3 = 0,0119 x - 2,47$, para cada sensor, sendo “y” o valor de pressão (bar) e “x” o valor disponibilizado pelo conversor A/D do microcontrolador.

Para estas funções, o coeficiente de correlação é $r = 1,00$. Logo, pode-se assumir que o valor disponibilizado evolui linearmente com a pressão (para o intervalo de valores em causa).

6.2 Comportamento do sensor de temperatura e humidade relativa

O sensor de temperatura e humidade relativa utilizado foi desenvolvido para ser utilizado à pressão atmosférica, estando no entanto a ser utilizado a pressões superiores. Assim, para analisar o comportamento do sensor quando sujeito a outras pressões, foi efetuada uma experiência que sujeita o sensor a diferentes pressões, tendo sido implementado um ciclo de pressurizações e despressurizações da câmara do cilindro (volume de cerca de $41,2 \text{ cm}^3$). Foram utilizados quatro níveis de pressão, estando o sistema a operar 5 minutos em cada nível. O ajuste de pressão foi feito manualmente, na válvula reguladora de pressão. Durante esta experiência, os valores de pressão, temperatura e humidade foram recolhidos a uma frequência de cerca de 1 Hz. Os resultados obtidos são apresentados na figura 6.1.

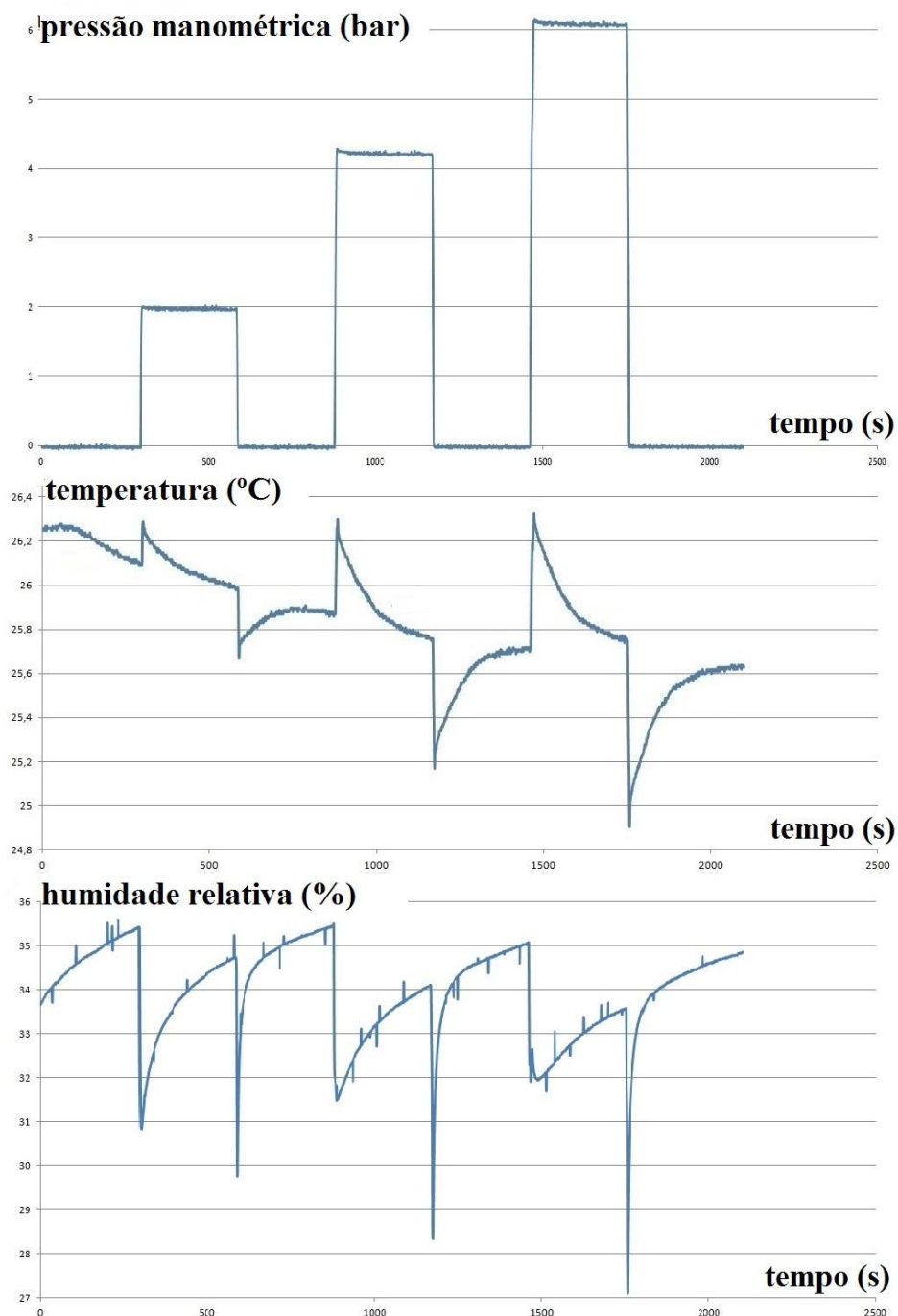


Figura 6.1: Evolução da temperatura e humidade para diferentes níveis de pressão

Da análise dos gráficos da figura 6.1, verificou-se que a temperatura do ar sofre uma mudança brusca, mas pouco significativa em valor absoluto (0,2 a 0,8 °C), coincidente com os instantes da pressurização e despressurização da câmara do cilindro. Assim, quando a câmara é pressurizada, a temperatura aumenta e quando é despressurizada a temperatura diminui. O efeito é tanto maior quanto maior for o valor da pressão utilizada. Relativamente à humidade relativa, verifica-se que no instante da pressurização e despressurização ocorre uma diminuição brusca do valor lido, seguida de um retorno lento. De notar, que quando a temperatura diminui, a humidade relativa aumenta, independentemente do nível de pressão, o que é expectável. Há no entanto que ter em consideração que o sensor utilizado foi desenvolvido para medição de temperatura e humidade relativa para operar em torno da pressão atmosférica, pelo que os valores lidos de humidade relativa possam ser condicionados pelo facto de o sensor estar sujeito a uma pressão superior, embora o fabricante indique que o sensor pode suportar pressões de 20 bar.

6.3 Evolução da pressão nas câmaras do cilindro

De modo a analisar a influência da utilização do sensor de temperatura e humidade relativa no circuito pneumático, foi feita uma experiência que consiste em analisar a evolução de pressão nas câmaras do cilindro pneumático, sem o sensor de humidade e temperatura, com 2 movimentos com temporização de cerca de 4 segundos e uma pressão de operação de 4 bar. Foi realizada a mesma experiência com o sensor de temperatura e humidade integrado no sistema.

Nos gráficos, para além dos valores de pressão nas câmaras do cilindro, pode-se visualizar o estado dos fins de curso e do comando de acionamento do relé da eletroválvula, registados a uma frequência de 37 Hz.

Na figura 6.2 é possível visualizar a evolução da pressão nas câmaras do cilindro, sem sensor de humidade e temperatura, onde foram realizados 2 movimentos com temporização entre movimentos.

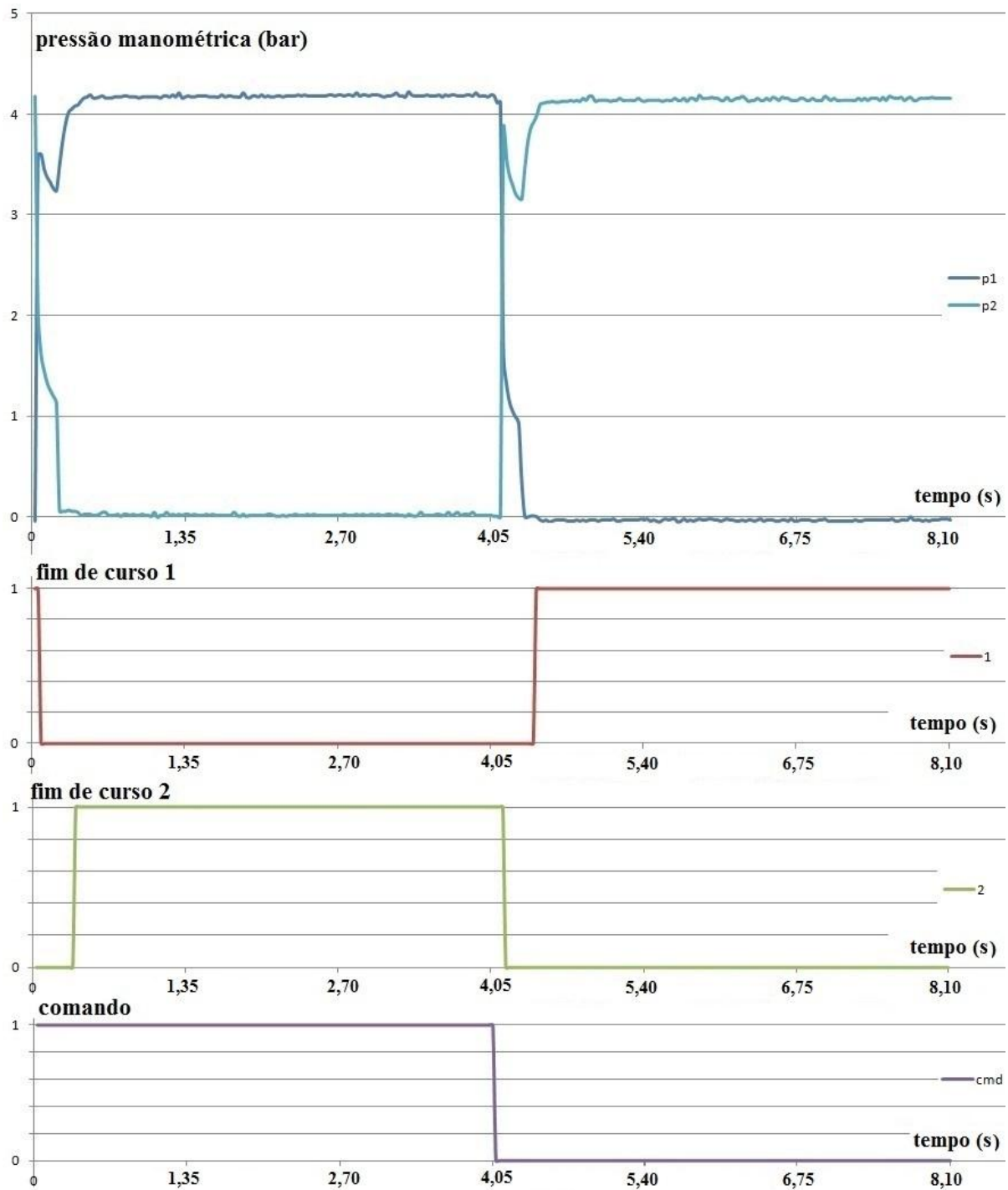


Figura 6.2: Dois movimentos, com temporização, sem utilização do sensor de temperatura e humidade, para uma pressão de 4 bar

Na figura 6.3, é possível visualizar a evolução da pressão nas câmaras do cilindro, na situação que contém o sensor de humidade e temperatura, onde foram realizados 2 movimentos com temporização.

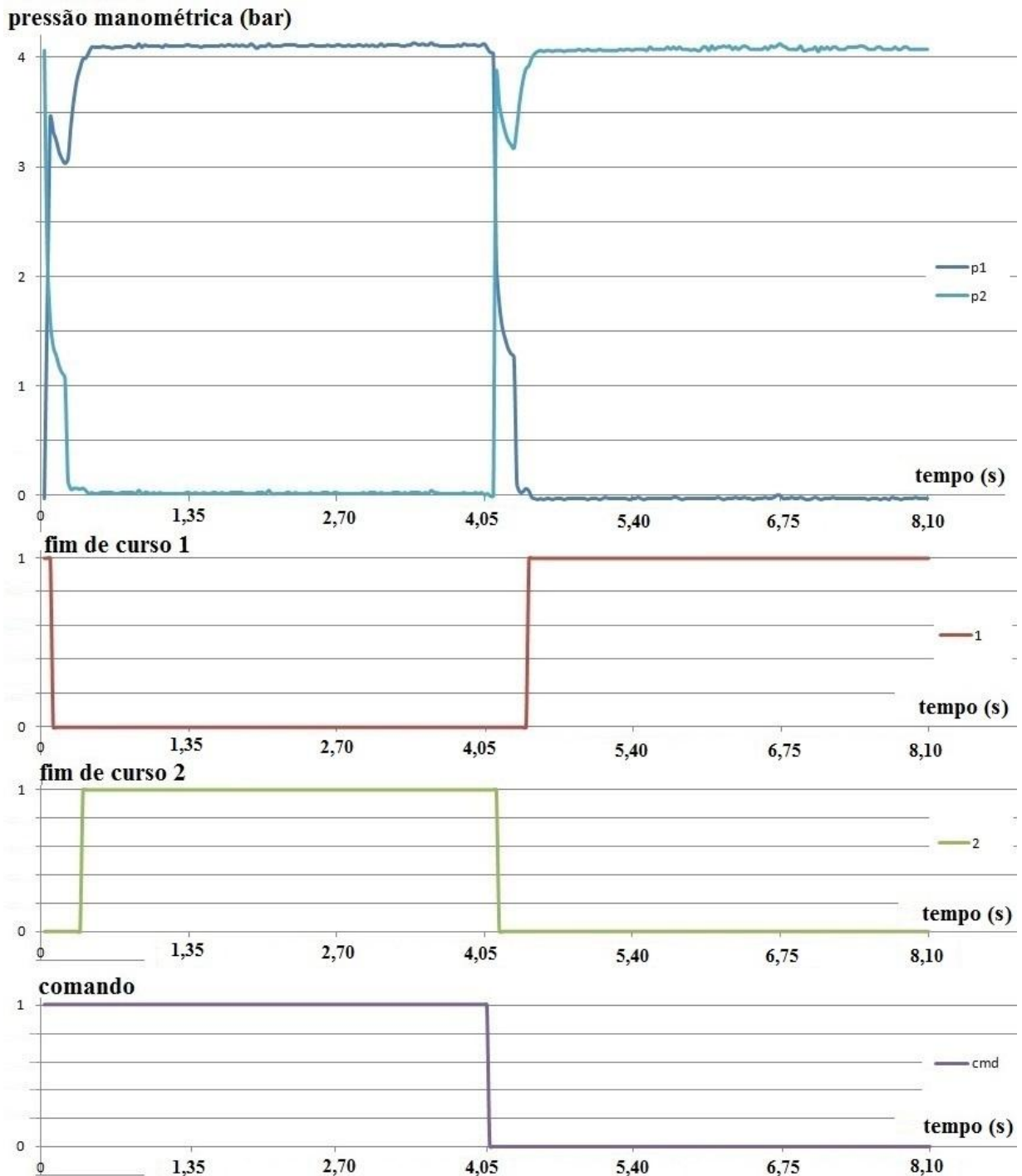


Figura 6.3: Dois movimentos, com temporização, para uma pressão de 4 bar

Da análise dos gráficos da figura 6.2 e 6.3, verifica-se que o perfil de pressões e os valores de pressão atingidos são similares, bem como os tempos de movimento. Com o uso do sensor de humidade e temperatura verifica-se uma maior queda de pressão na câmara 1 (mas pouco significativa) quando o cilindro inicia o movimento. O volume extra e a queda de pressão que o uso do sensor de temperatura e humidade introduz no circuito não tiveram influência significativa no comportamento do sistema pneumático.

De modo a analisar o perfil de pressão nas câmaras do cilindro, foi realizada uma experiência de 4 movimentos, sem temporização, com o sensor de temperatura e humidade integrado no sistema, a uma pressão de alimentação de cerca de 4 bar.

Na figura 6.4 é possível visualizar a evolução da pressão nas câmaras do cilindro, os fins de curso e a ordem de comando, para uma pressão de operação de 4 bar.

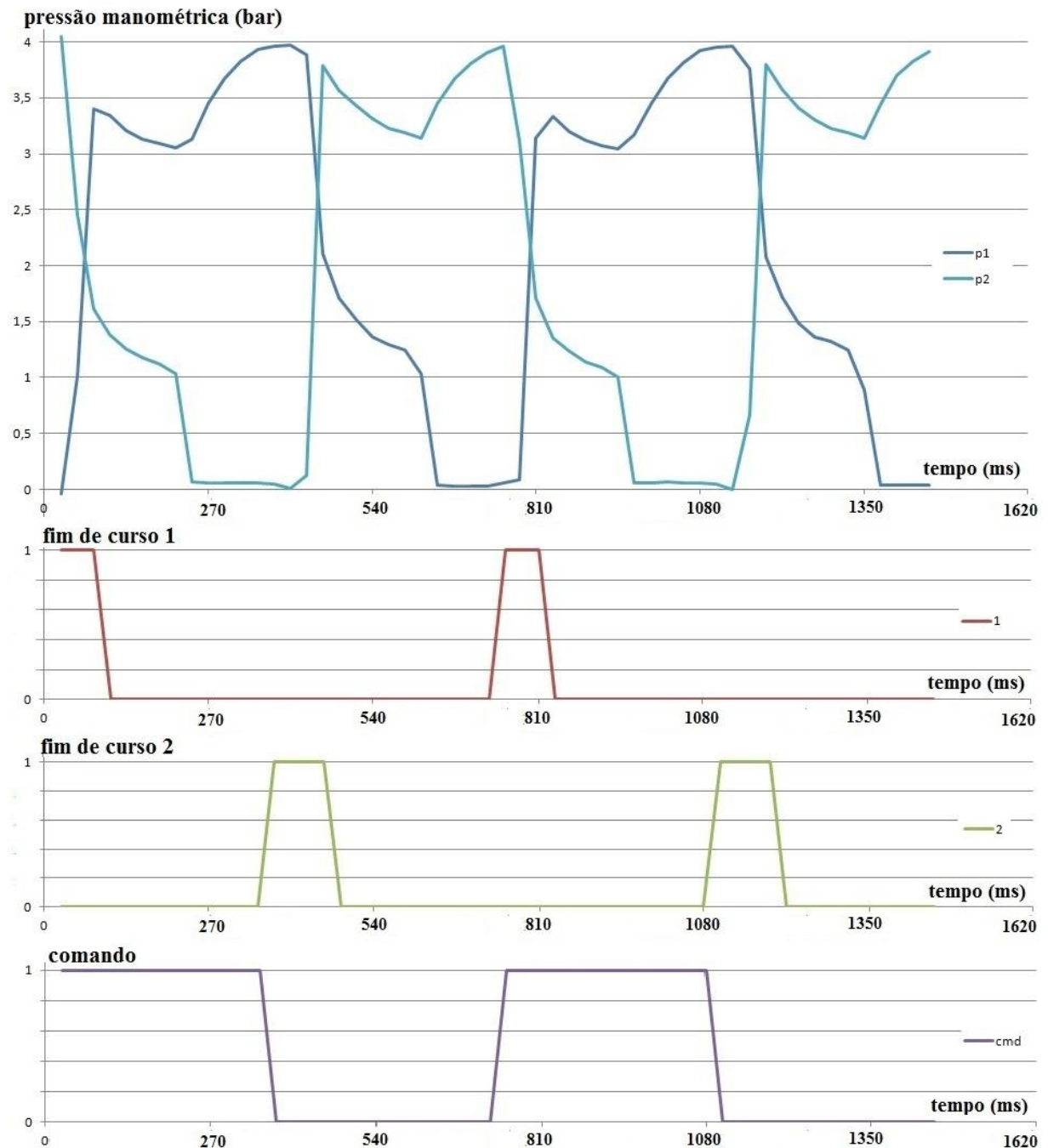


Figura 6.4: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de 4 bar

Da análise do gráfico 6.4, verifica-se que, no início, a pressão na câmara 1 vai aumentando e quando o fim de curso 1 deixa de estar atuado (no início do “avanço” do cilindro) ocorre uma queda de pressão na câmara 1, antes da pressão estabelecida ser atingida. À medida que o cilindro se desloca, a pressão volta a aumentar e atinge o valor estabelecido quando o fim de curso 2 é atuado. É possível verificar que a pressão não cai imediatamente quando se dá

ordem de desligar o relé da eletroválvula. Quando o cilindro se começa a mover no sentido contrário, a pressão ainda não atingiu o valor de 0 bar. O valor de 0 bar é atingido antes do fim de curso 1 ser atuado. Para a câmara 2 também ocorre o mesmo fenómeno.

De modo a analisar a influência da pressão no tempo de avanço/recuo, foram realizadas experiências para a pressão de 2 e 6 bar, realizando 4 movimentos sem temporização. Na figura 6.5 é possível visualizar a evolução da pressão nas câmaras do cilindro, para uma pressão de alimentação de 2 bar.

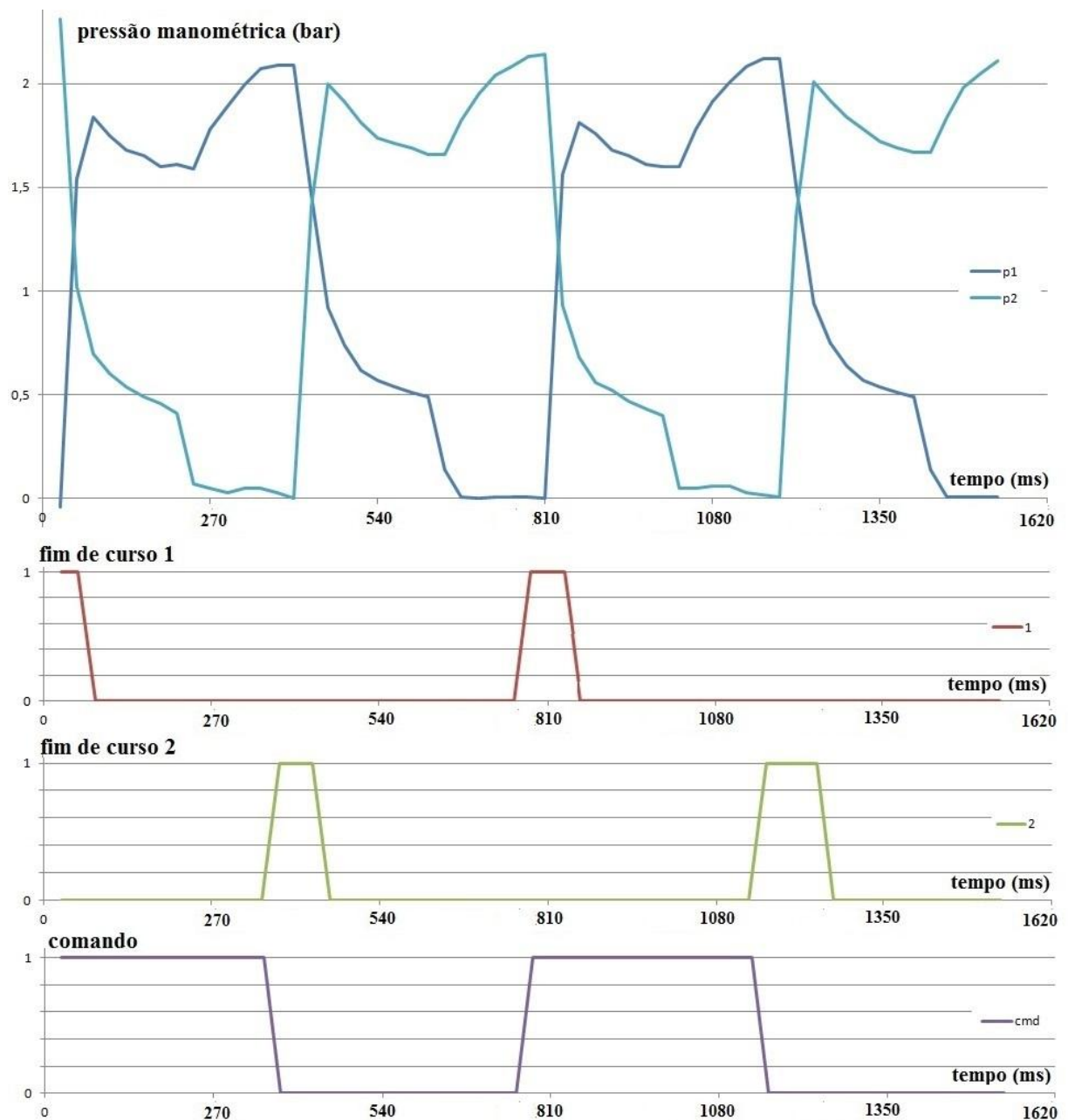


Figura 6.5: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de 2 bar

Na figura 6.6 é possível visualizar a evolução da pressão nas câmaras do cilindro, para uma pressão de alimentação de 6 bar.

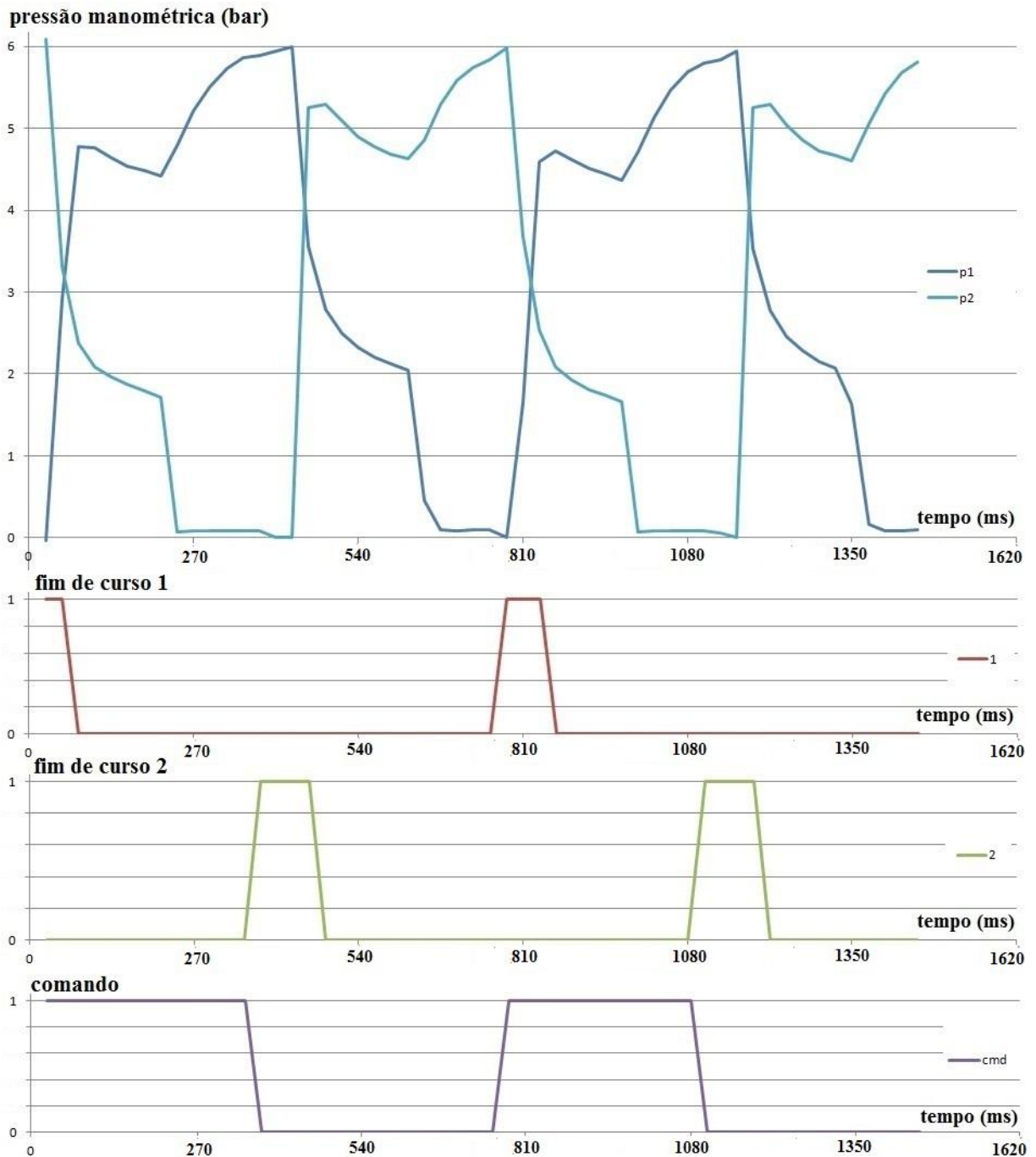


Figura 6.6: Quatro movimentos, sem temporização, para uma pressão de 6 bar

Da análise dos resultados e do gráfico da figura 6.4 conclui-se que para 2 bar, durante o avanço/recuo são realizadas entre 11 a 12 leituras. Uma leitura corresponde a cerca de 27 ms. Pode-se deduzir que o sistema permanece em movimento entre 297 e 324 ms.

Para 4 bar, durante o “avanço/recuo” são realizadas 10 leituras. O sistema permanece em movimento, durante cerca de 270 ms.

Para 6 bar, durante o “avanço/recuo” são realizadas entre 9 a 11 leituras. O sistema permanece em movimento entre 243 e 297 ms.

Para 2 bar, a velocidade é mais baixa, mas para 4 e 6 bar, a velocidade é aproximadamente semelhante. Para 4 e 6 bar, não é estranho os tempos serem bastante semelhantes, porque o cilindro não tem carga aplicada.

Apesar do cilindro “recuar” ou “avançar” em função dos fins de curso, os fins de curso são lidos entre 3 a 4 vezes ainda atuados, para os 3 valores de pressão. Pode-se deduzir que o sistema permanece entre 81 a 108 ms nos fins de curso.

Em ambos os casos, o cilindro começou a deslocar-se antes da pressão estabelecida ser atingida.

6.4 Evolução da temperatura numa câmara do cilindro

Foram realizadas 3 experiências para 3 níveis de pressão, realizando 1500 movimentos sem temporização. A frequência de aquisição de dados é de cerca de 37 Hz.

Na figura 6.7 é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do cilindro, à pressão de 2 bar.

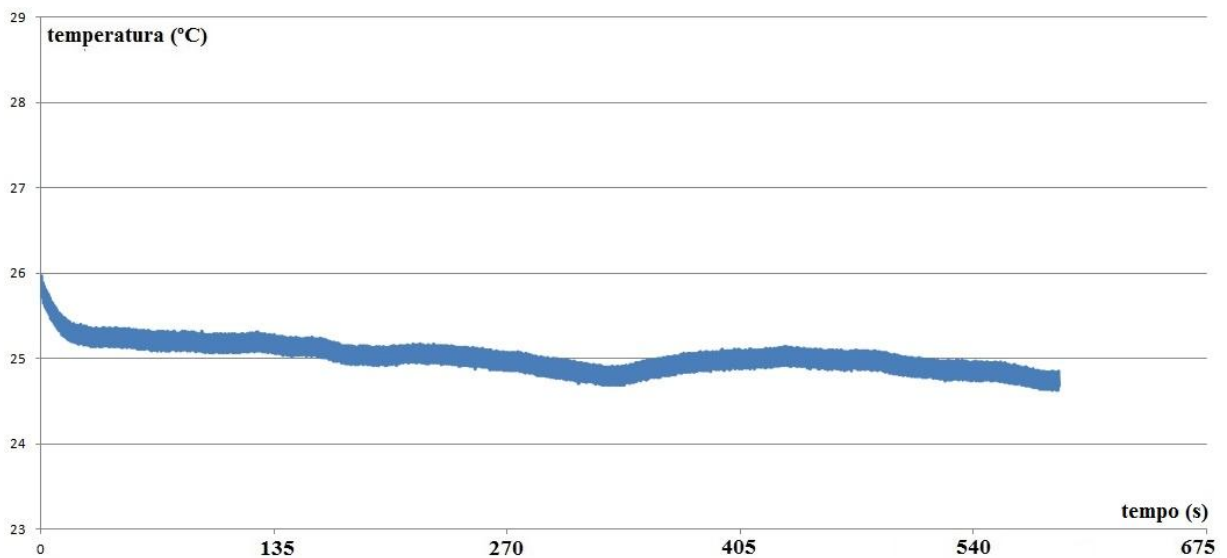


Figura 6.7: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar

Na figura 6.8 é possível visualizar a evolução da temperatura, para os primeiros 43 s.

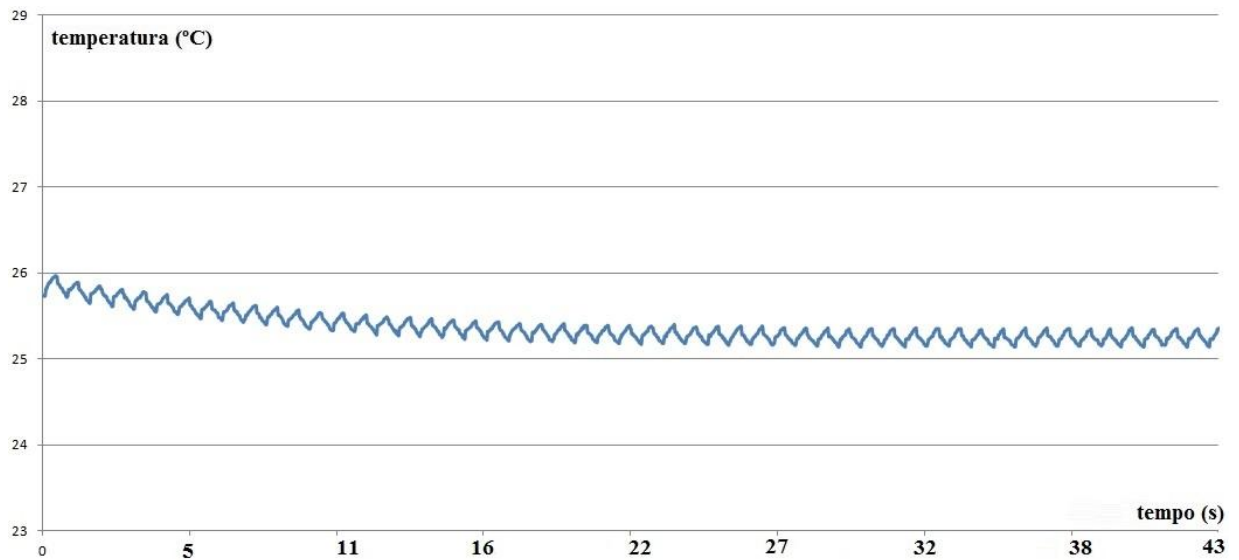


Figura 6.8: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar

Na figura 6.9 é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do, à pressão de 4 bar.

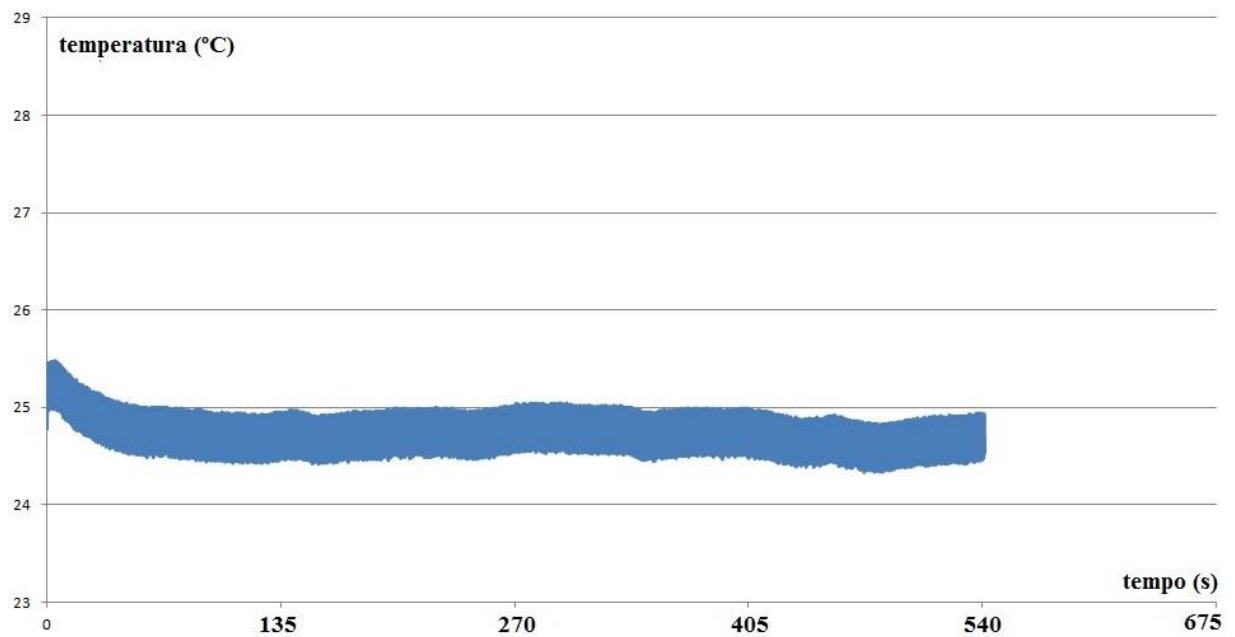


Figura 6.9: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar

Na figura 6.10 é possível visualizar a evolução da temperatura, para os primeiros 43 s.

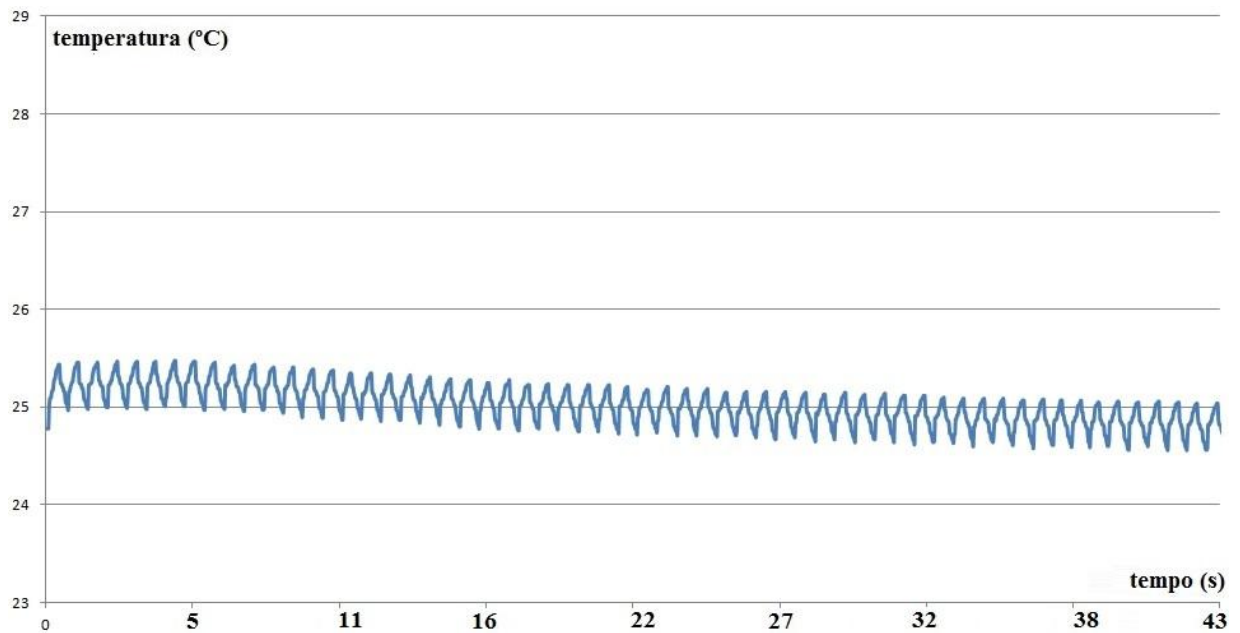


Figura 6.10: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar

Na figura 6.11 é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do cilindro, à pressão de 6 bar.

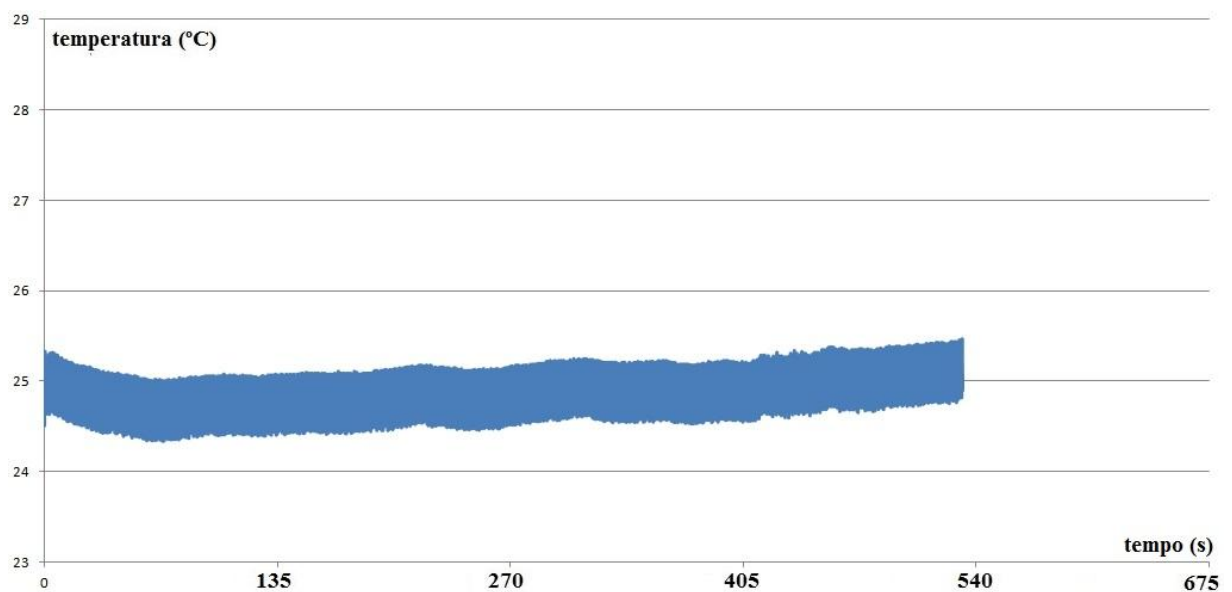


Figura 6.11: Evolução da temperatura durante 1500 movimentos, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar

Na figura 6.12 é possível visualizar a evolução da temperatura, para os primeiros 43 s.

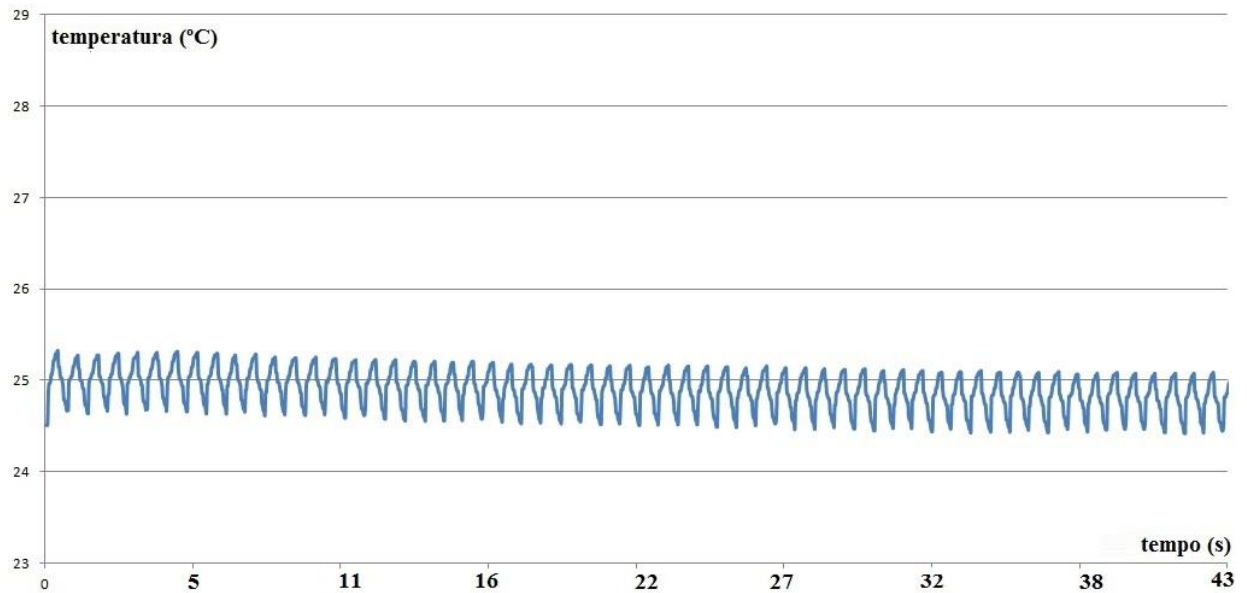


Figura 6.12: Evolução da temperatura durante os primeiros 43 s, sem temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar

O valor de temperatura mantém-se praticamente constante.

A partir das figuras 6.8, 6.10 e 6.12, é possível verificar que quando a câmara é pressurizada, a temperatura aumenta e quando é despressurizada a temperatura diminui.

Na figura 6.7, a amplitude pico a pico da oscilação de temperatura é de cerca de 0,2 °C, na figura 6.9 é de 0,4 °C e na figura 6.11 é de 0,6 °C. É possível deduzir que quanto maior a pressão, maior é a amplitude da oscilação do valor de temperatura.

Para 2 bar, foram necessários quase 600 s para concluir o ensaio, para 4 bar, pouco mais de 540 s e para 6 bar, pouco menos de 540 s. Quanto maior a pressão, menor foi o tempo necessário para realizar o ensaio, mas para 4 e 6 bar, o tempo é aproximadamente semelhante. A partir de um certo valor de pressão, não se obtém um grande aumento de velocidade do cilindro, especialmente se não existir carga aplicada.

Foram feitas 3 experiências para 3 níveis de pressão, realizando 100 movimentos com temporização de cerca de 4 s. A frequência de aquisição de dados é de cerca de 37 Hz.

Na figura 6.13, é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do cilindro, à pressão de 2 bar.

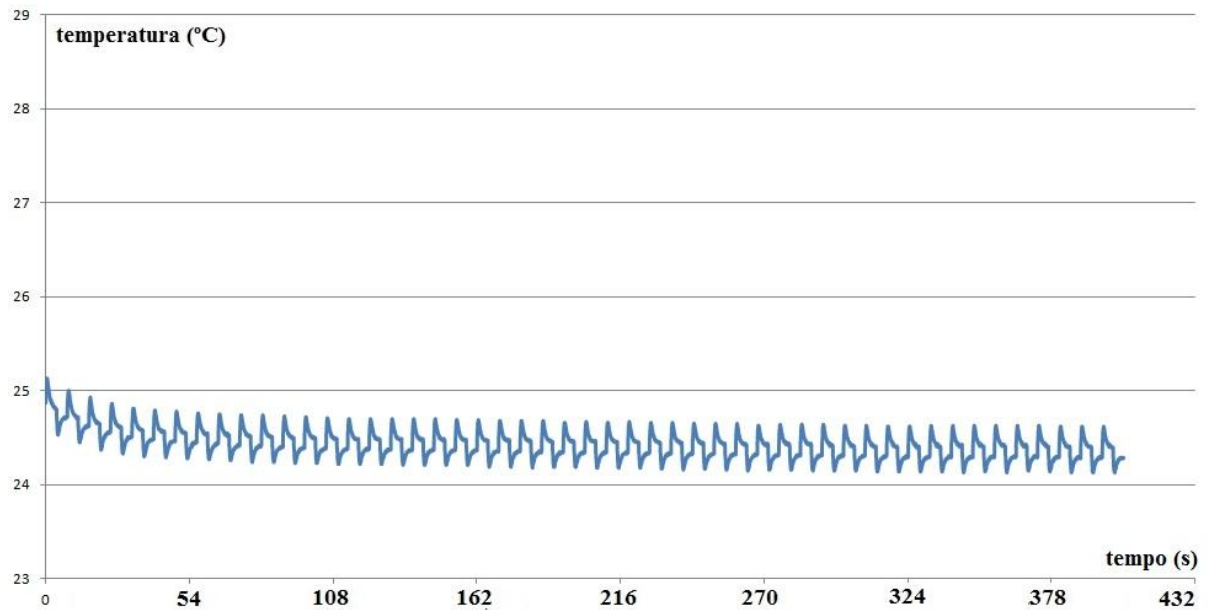


Figura 6.13: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 2 bar

Na figura 6.14 é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do cilindro, à pressão de 4 bar.

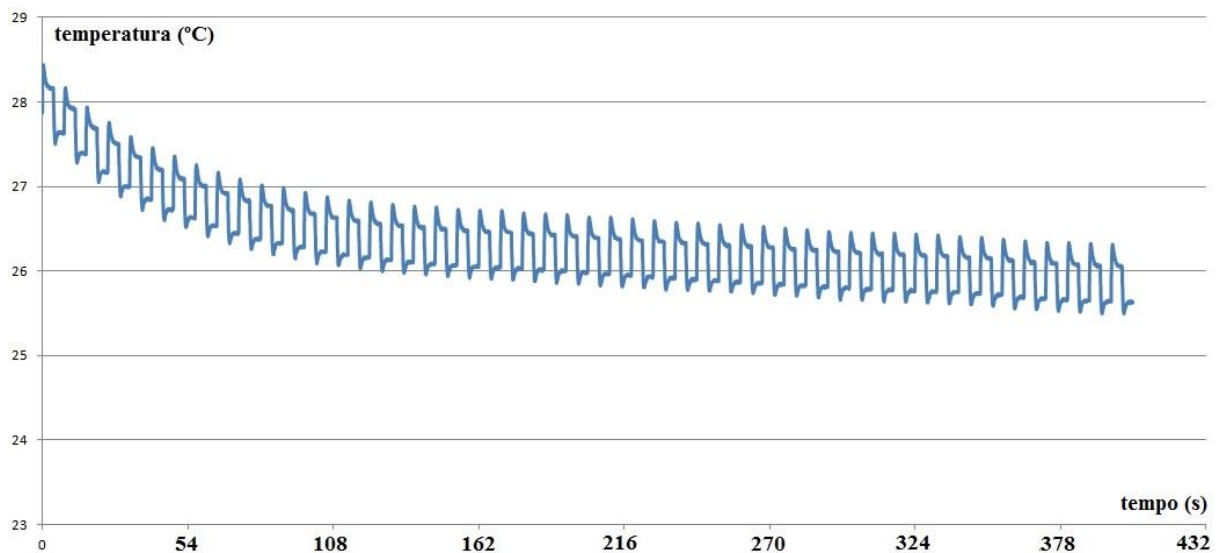


Figura 6.14: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 4 bar

Na figura 6.15 é possível visualizar a evolução da temperatura na linha de alimentação da câmara do cilindro, à pressão de 6 bar.

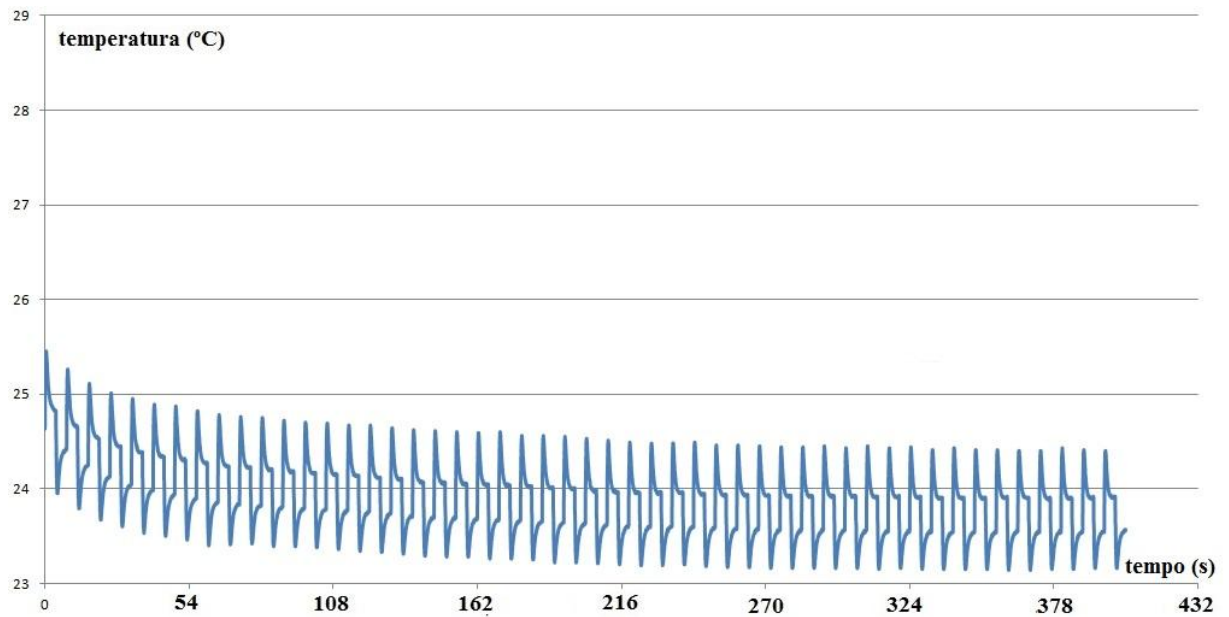


Figura 6.15: Evolução da temperatura durante 100 movimentos, com temporização, com cilindro alimentado à pressão de 6 bar

Na figura 6.13, a amplitude pico a pico da oscilação de temperatura é de cerca de 0,5 °C, na figura 6.14 é de 1 °C e na figura 6.15 é de quase 1,5 °C. Com tempo entre movimentos, a amplitude da oscilação da evolução da temperatura é maior, porque a câmara é pressurizada/despressurizada durante mais tempo.

7 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

7.1 Conclusões

O principal objetivo desta Dissertação foi a implementação de um sistema de controlo e monitorização que permita a aquisição e registo da informação em base de dados com possibilidade de acesso remoto para um sistema pneumático. Este objetivo foi alcançado, sendo possível controlar e monitorizar um sistema pneumático com um microcontrolador Arduino, a partir da rede local. A plataforma Arduino é uma solução menos robusta e com menor capacidade de expansão que um PLC, mas que constitui uma opção funcionalmente viável e económica.

A partir de qualquer computador ligado à rede local é possível definir o nº de movimentos de um cilindro pneumático e o tempo entre cada movimento. Foi possível dotar o sistema de aquisição de dados de uma frequência não muito alta, mas suficiente para monitorizar a evolução da pressão e temperatura num sistema pneumático. Também foi possível registar os valores dos sensores utilizados numa base de dados e aceder aos dados na mesma rede local.

O sistema desenvolvido permite assim a implementação de uma experiência de acesso remoto. É possível realizar uma série de ensaios de comando de um cilindro pneumático, avaliando a evolução de pressão, temperatura, humidade e tempos de execução de movimentos.

A análise dos valores registados ao longo do tempo pode ajudar a manutenção preventiva, permitindo prever futuros maus funcionamentos. Por exemplo, uma queda sistemática de pressão numa dada componente do sistema pneumático, pode ajudar a prever quando deve ser substituída. Os dados obtidos podem ser usados para estimar o estado do sistema pneumático, comparando com valores de “referência” para avaliar o desempenho do sistema. Uma temperatura excessiva pode indicar um mau funcionamento do sistema pneumático, devido a, por exemplo, má lubrificação.

O sistema desenvolvido também permite realizar experiências para analisar o comportamento de um sistema pneumático. A partir das experiências realizadas verificou-se que ocorre uma queda de pressão, na câmara que está a ser pressurizada, no momento em que o cilindro inicia o movimento. Também se verificou que quando a câmara é pressurizada, a temperatura aumenta e quando é despressurizada a temperatura diminui. A partir de um certo valor de pressão não se obtém um grande aumento de velocidade do cilindro, especialmente se não existir carga aplicada.

7.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

De modo a aumentar as capacidades do sistema, propõem-se as seguintes tarefas:

- Desenvolver uma interface com o utilizador mais completa e flexível;
- Incorporar um maior número de sensores, em diferentes zonas e de diferentes tipos, como por exemplo, um sensor de caudal e de humidade adequados a um sistema pneumático;
- Implementar válvulas reguladoras de pressão de comando elétrico, de modo a permitir dotar o sistema de maior flexibilidade de controlo;
- Permitir o ajuste da frequência de aquisição de dados;
- Integrar o sistema na plataforma Moodle, de modo a flexibilizar a sua utilização como experiência remota e incorporar o uso de uma câmara de vídeo;
- Disponibilizar todos os parâmetros da base de dados na mesma página web e no mesmo ficheiro Excel;
- Comparar os valores lidos com valores de “referência” e incorporar o envio de alertas.

Referências

- [1] GISON Machinery Co, Compressed air system network and components, <https://www.gison.com.tw/en/page/Compressed-Air-System-Network-and-Components/air-tool-application.html>
- [2] SMC, Precautionary measures against condensation in a pneumatic system, www.smcworld.com/docs/technological_material/en/.../P-E01-11B-condensation.pdf
- [3] Aventics, Smart Pneumatics Monitor, https://www.aventics.com/media/Produkte/Expertise/Trends_und_Themen_UEbersicht/Industrie_4.0/Screen_016-17AVE_Brosch_Digital_EN.pdf
- [4] Festo, System Diagnostics, https://www.festo.com/cms/en-us_us/9851.htm
- [5] Bimba, IntelliSense®, <https://www.bimba.com/sites/default/files/Library%20Archives/Catalogs/Bimba/IntelliSense.pdf>
- [6] Festo, Standard cylinders DSNU/DSNUP/DSN/ESNU/ESN, ISO 6432, https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/DSNU-ISO_ENUS.PDF
- [7] Joucomatic, SOLENOID SPOOL VALVES, http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_nl/pdf1/P561gb.pdf
- [8] SMC, D-A73, <https://www.alliedelec.com/m/d/b427b4b82e0b07e35a1d6ea3386f7b9b.pdf>
- [9] SMC, ISE40A, <https://content2.smcetech.com/pdf/manuals/PSxx-OMM0007-G.pdf>
- [10] Bosch, BME280, <https://www.embeddedadventures.com/datasheets/BME280.pdf>
- [11] Adafruit, BME280, <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme280-humidity-barometric-pressure-temperature-sensor-breakout.pdf>
- [12] Arduino, Uno, <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>
- [13] Arduino, Relay shield, <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino-4-Relays-Shield-V1.pdf>
- [14] Finder, 30 series, <https://www.finder-relais.net/en/finder-relays-series-30.pdf>
- [15] Arduino, Ethernet shield 2, https://www.mouser.com/catalog/specsheets/A000056_DATASHEET.pdf

ANEXO A: Endereços utilizados no browser

<http://192.168.121.177>

http://192.168.121.58/contadorget_data.php

http://192.168.121.58/comandoget_data.php

http://192.168.121.58/fimdecursolget_data.php

http://192.168.121.58/fimdecursol2get_data.php

http://192.168.121.58/pressao1get_data.php

http://192.168.121.58/pressao2get_data.php

http://192.168.121.58/pressao3get_data.php

http://192.168.121.58/humidadeget_data.php

http://192.168.121.58/temperaturaget_data.php

http://192.168.121.58/contadorUserReport_Export.php

http://192.168.121.58/comandoUserReport_Export.php

http://192.168.121.58/fimdecursol1UserReport_Export.php

http://192.168.121.58/fimdecursol2UserReport_Export.php

http://192.168.121.58/pressao1UserReport_Export.php

http://192.168.121.58/pressao2UserReport_Export.php

http://192.168.121.58/pressao3UserReport_Export.php

http://192.168.121.58/humidadeUserReport_Export.php

http://192.168.121.58/temperaturaUserReport_Export.php

http://192.168.121.58/clean_data.php